

คุณสมบัติโพโตรีแฟรกทีฟและการประยุกต์ใช้งานใน  
ผลึกลิเทียมไนโอเบต

Photorefractive Properties and Application of  
Lithiumniobate crystal (  $\text{LiNbO}_3$  )



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

คุณสมบัติโพโตรีแฟรกทีฟและการประยุกต์ใช้งานใน  
ผลึกลิเทียมไนโอเบต

Photorefractive Properties and Application of  
Lithiumniobate Crystal (  $\text{LiNbO}_3$  )



00265959

TB00213

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Photorefractive Properties and Application of  
Lithiumniobate Crystal (  $\text{LiNbO}_3$  )



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)  
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หัวข้อโครงการพิเศษ** คุณสมบัติโพโตรีแฟรกทิฟและการประยุกต์ใช้งานในผลึกลิเทียมไนโอเบต  
Photorefractive Properties and Application of Lithiumniobate Crystal ( LiNbO3 )

**ชื่อนักศึกษา** นายบัณฑิต เลิศศรีปรียา รหัสนักศึกษา 55051539  
นายอมเรศ ศากยวงศ์ รหัสนักศึกษา 55051671

**ปริญญา** วิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)

**ภาควิชา** ฟิสิกส์

**ปีการศึกษา** 2558

**อาจารย์ที่ปรึกษา** ผศ.ดร.ประธาน บุรณศิริ

คณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข ประธานกรรมการ	
อ.สุรชาติ กมลดีลก กรรมการ	
อ.ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง กรรมการ	
ผศ.ดร.ประธาน บุรณศิริ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

### ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>หัวข้อโครงการพิเศษ</b>	คุณสมบัติโพโตรีแฟรกทิฟและการประยุกต์ใช้งานในผลึกลิเทียมไนโอเบต	
<b>ชื่อนักศึกษา</b>	นายบัณฑิต เลิศศรีปรียา	รหัสนักศึกษา 55051539
	นายอมเรศ ศากยวงศ์	รหัสนักศึกษา 55051671
<b>ปริญญา</b>	วิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)	
<b>ภาควิชา</b>	ฟิสิกส์	
<b>คณะ</b>	วิทยาศาสตร์	
<b>มหาวิทยาลัย</b>	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)	
<b>ปีการศึกษา</b>	2558	
<b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>	ผศ.ดร.ประธาน บุรณศิริ	

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาการเกิดปรากฏการณ์โพโตรีแฟรกทิฟในผลึกลิเทียมไนโอเบตและการนำปรากฏการณ์โพโตรีแฟรกทิฟมาประยุกต์ใช้ในเรื่อง โฮโลกราฟิกรีนเทอเพียร์โรมิเตอร์ โดยใช้ผลึกโพโตรีแฟรกทิฟคือ ผลึกลิเทียมไนโอเบต ( $\text{LiNbO}_3$ ) ขนาด 7 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ทำการทดลองโดยการวัดค่าความเข้มแสงที่ได้จากปรากฏการณ์โพโตรีแฟรกทิฟจากแต่ละหน้าผลึกและใช้หน้าผลึกที่วัดความเข้มแสงได้มากที่สุดในการประยุกต์ใช้ในโฮโลกราฟิกรีนเทอเพียร์โรมิเตอร์ ซึ่งแบ่งการทดลองเป็น 2 รูปแบบคือ การจัดรูปแบบการทดลองแบบ ไมเคลสัน และการจัดการทดลองแบบ In-line จุดประสงค์เพื่อถ่ายภาพโฮโลแกรมที่ผลึกสามารถบันทึกไว้ได้โดยวัตถุที่เข้ม 3 ชนิดคือ ตัวอักษร K ที่แปะบนแผ่นพลาสติกใส, เปลมเทียน และ หัวแร้งบัดกรี ผลการทดลองพบว่า ในการเกิดปรากฏการณ์โพโตรีแฟรกทิฟบนผลึกลิเทียมไนโอเบตเมื่อวัดความเข้มแสงที่ได้จากผลึกหน้าผลึกที่ 3 และ 4 ให้ความเข้มแสงได้มากที่สุด จึงใช้หน้าผลึกดังกล่าวในการประยุกต์ทางเรื่องโฮโลกราฟิกรีนเทอเพียร์โรมิเตอร์ผลที่ได้พบว่าการจัดอุปกรณ์การทดลองแบบไมเคลสันสามารถถ่ายภาพโฮโลแกรมได้แต่ภาพที่ได้นั้นมีความคมชัดน้อยเพราะการสูญเสียความเข้มแสงเนื่องจากแสงผ่านอุปกรณ์การทดลองหลายอย่างทำให้แยกองค์ประกอบภาพได้ยาก และในการทดลองแบบ In-line สามารถถ่ายภาพโฮโลแกรมได้เช่นกันแต่เนื่องจากอุปกรณ์การทดลองที่น้อยกว่าทำให้ภาพที่ได้มีความคมชัดมากกว่าการทดลองแบบไมเคลสัน จึงสามารถแยกองค์ประกอบภาพได้ง่ายและภาพที่ได้จะแสดงเป็นภาพโฮโลกราฟิกรีน

**คำสำคัญ :** ลิเทียมไนโอเบต โพโตรีแฟรกทิฟ อินเทอเพียร์โรมิเตอร์ โฮโลกราฟิกรีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Photorefractive Properties and Application of Lithiumniobate Crystal ( $\text{LiNbO}_3$ )
<b>Student</b>	Mr.Bandit Lertsripriya Student ID 55051539 Mr.Amares Sakayawong Student ID 55051671
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Applied Physic)
<b>Department</b>	Physics
<b>Faculty</b>	Science
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
<b>Academic Year</b>	2558
<b>Advisor</b>	Asst.Prof.Dr.Prathan Buranasiri

### Abstract

This special project studied the photorefractive effect in photorefractive crystal (PRCs) and applied photorefractive effect to holography interferometer. Lithium niobate ( $\text{LiNbO}_3$ ) 7 cubic millimeters in size were used as photorefractive crystal. Measuring the light intensity of the photorefractive effect from each crystal face. And using crystal face photometric most applications in holographic interferometer. The study was divided into two styles to format the Michaelson trial and the In-line trial. To take a holographic picture that crystal can record, the object using a third kind is the letter K on a sticky plastic sheet, candle flame and soldering iron. The results showed that the phenomenon of photorefractive effect on the lithium niobate. When measuring the light intensity can be found on face 3 and 4 for the crystal light possible. Use these crystals face to make holographic interferometer. The results showed that the device was a Michaelson can take holograms pictures, but the picture is so less sharp because the loss of light intensity due to light through many trials to make it worse. The experimental design In-line can take holographic pictures But since the device was less than Michaelson trial, the image that is sharper.

**Keywords** : Holographic, Interferometer, Lithium niobate, Photorefractive

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากความกรุณาและความร่วมมือของ  
 ทุกๆท่าน ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ประธาน บุรณศิริ ที่คอยให้คำปรึกษาดูแลอย่างใกล้ชิดและให้ความ  
 ช่วยเหลือแนะนำที่ดีในการปรับปรุงข้อบกพร่องในการทำโครงการพิเศษและขอขอบพระคุณกรรมการ  
 สอบโครงการพิเศษ คือ ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข, อาจารย์สุรชาติ กมลติลล และ อาจารย์ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง  
 ที่ให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่ให้ได้รับการศึกษา ตลอดจนคอยเลี้ยงดูและอบรมสั่งสอนและ  
 เป็นกำลังใจเป็นแรงผลักดันในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงเพื่อนๆ พี่ๆใน  
 ห้องแล็บและบุคคลอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวมา ผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

นาย บัณฑิต เลิศศรีปรียา

นาย อมเรศ ศากยวงศ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง-จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช-ซ
คำย่อ/สัญลักษณ์	ฌ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 แนวทางการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	3
2.1 โครงสร้างผลึก	3
2.1.1 การเรียงตัวของอะตอมของผลึก	3
2.1.2 รูปแบบของผลึก	3
2.1.3 คุณสมบัติของผลึกลิเทียมไนโอเบต	4
2.1.4 กลุ่มของผลึกและการเลือกผลึกในการใช้งาน	5
2.2 แบบจำลองการเคลื่อนย้ายประจุระหว่างแถบพลังงาน	6
2.3 การเดินทางของคลื่นแสงในตัวกลางแบบเป็นคาบ	14
2.4 ปรากฏการณ์การผสมคลื่นในตัวกลางโฟโตรีแฟรกทีฟ	18
2.5 โฮโลแกรม (Hologram)	19
2.5.1 ประวัติและความเป็นมา	19
2.5.2 วิธีการทำงานของโฮโลแกรม	19
2.5.3 ระบบการจัดการบันทึกภาพของโฮโลแกรม	21
2.6 ไดนามิก โฮโลกราฟิค อินเทอเพียริโรมิเตอร์ : อุปกรณ์และการประยุกต์ใช้	23
2.6.1 ประวัติ	23
2.7 Photorefractive Holographic Interferometer	24
2.7.1 โครงสร้างผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟ	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.7.2 การบันทึกทางเรขาคณิต	26
2.8 Real-time Photorefractive Interferometer for Dynamic Phase Perturbation by Self-interference in LiNbO <sub>3</sub>	26
2.8.1 ความเป็นมา	26
2.8.2 ลักษณะของอินเทอเฟียร์โรเมทรี	27
2.9 ฮีเลียม-นีออนเลเซอร์(He-NeLaser)	29
2.9.1 การเกิดแสงเลเซอร์	30
2.10 กล้องCCD	31
2.11 กระจกและเลนส์	32
2.11.1 เลนส์นูนหรือเลนส์รวมแสง	32
2.11.2 เลนส์เว้าหรือเลนส์กระจายแสง	33
2.11.3 ส่วนสำคัญของเลนส์	33
2.11.4 การหักเหของแสงผ่านเลนส์	33
2.11.5 การหาตำแหน่งภาพ	34
2.11.6 กำลังขยาย	35
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	36
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล</b>	42
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	59
เอกสารอ้างอิง	62
ประวัติผู้เขียน	63

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แนวทางการดำเนินงาน	2
2.1 แสดงคุณสมบัติของผลึกลิเทียมไนโอเบต	4
4.1 แสดงความเข้มแสงที่เกิดจากปรากฏการณ์โพโตรีแฟรกทีฟของผลึกลิเทียมไนโอเบต	44
4.2 เปรียบเทียบภาพตัวอักษร K แบบต่างๆ และค่าความเข้มแสงที่วัดได้ในกรณีที่ไม่ผ่านผลึก	45
4.3 เปรียบเทียบภาพตัวอักษร K แบบต่างๆ และค่าความเข้มแสงที่วัดได้ในกรณีที่ผ่านมาผลึก	46
4.4 เปรียบเทียบภาพเปลวเทียนแบบต่างๆ และค่าความเข้มแสงที่วัดได้ในกรณีที่ไม่ผ่านผลึก	47
4.5 เปรียบเทียบภาพเปลวเทียนแบบต่างๆ และค่าความเข้มแสงที่วัดได้ในกรณีที่ผ่านมาผลึก	48
4.6 แสดงภาพโฮโลแกรมที่ผลึกบันทึกเอาไว้ได้เป็นรูปร่างเท่ากันที่มีส่วนที่เป็นแถบมืด และสว่างสลับกัน	50
4.7 แสดงความเข้มแสงที่ลดลงต่อเวลา	55
5.1 แสดงความเข้มแสงที่เกิดจากปรากฏการณ์โพโตรีแฟรกทีฟของผลึกลิเทียมไนโอเบต	59
5.2 เปรียบเทียบภาพที่ได้ระหว่างภาพที่ผ่านมาผลึกและไม่ผ่านผลึก	60

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงโครงสร้างระหว่างวัตถุที่เป็นผลึก (Crystalline) และไม่เป็นผลึก (Amorphous)	3
2.2 แสดงโครงสร้างของผลึกลิเทียมไนโอเบตซึ่งเป็นแบบ trigonal, 3m	4
2.3 แสดงการดูดกลืนโฟตอนของอิเล็กตรอนเข้าสู่แถบนำกระแส ด้วยแบบจำลองการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ	6
2.4 แสดงกระบวนการสร้างดัชนีเกรตติงด้วยการแทรกสอดของลำแสงตกกระทบที่มีความเข้มแสงแบบเป็นคาบลงบนตัวกลางแบบอิเล็กโทรออปติกส์	10
2.5 แสดงการกระเจิงของคลื่นระนาบจากแสงเอกรงค์ลงบนตัวกลางแบบเป็นคาบ	16
2.6 แสดงการเลี้ยวเบนแสงในตัวกลางแบบเป็นคาบจากเกรตติงแบบบาง	17
2.7 การกระเจิงของแบรกก์เนื่องจากเกรตติงแบบหนาในตัวกลางโฟโตรีแฟรกทีฟ	18
2.8 แสดงการบันทึกภาพในโฮโลแกรม	21
2.9 แสดงการสร้างภาพในโฮโลแกรม	21
2.10 แสดงการจัดแบบ in-line	21
2.11 แสดงการจัดระบบแบบ michelson	22
2.12 แสดงการจัดระบบแบบ mach zehnder	22
2.13 แสดงการทำงานของกล้อง CCD	32
2.14 แสดงเลนส์นูนแบบต่างๆ	32
2.15 แสดงเลนส์เว้าแบบต่าง	33
2.16 แสดงการหักเหของแสงเมื่อผ่านเลนส์นูน	34
2.17 แสดงการหักเหของแสงเมื่อผ่านเลนส์เว้า	34
3.1 รูปแสดงการทดลองปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ (photorefractive effect)	36
3.2 แสดงการจัดอุปกรณ์จริงในการทดลองปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ (photorefractive effect)	37
3.3 รูปแสดงการวัดการถ่ายโอนพลังงานของแสง (Beam Transfer)	37
3.4 รูปแสดงการทดลองเพื่อเตรียมวัดการถ่ายโอนพลังงานของแสง (Beam Transfer)	38
3.5 รูปแสดงการทดลองพลวัตโฮโลกราฟี (Dynamic holography) โดยการจัดแบบไมเคลสัน (Michelson)	39
3.6 รูปแสดงการจัดอุปกรณ์จริงในการทดลองพลวัตโฮโลกราฟี (Dynamic holography) โดยการจัดแบบไมเคลสัน (Michelson)	40
3.7 รูปแสดงการทดลองพลวัตโฮโลกราฟี (Dynamic holography) โดยการจัดแบบอินไลน์ (In-line)	41

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 รูปแสดงการจัดอุปกรณ์จริงเพื่อทดลองพลวัตโฮโลกราฟี (Dynamic holography) โดยการจัดแบบอินไลน์ (In-line)	41
4.1 ผลึกลิเทียมไนโอเบตในขณะที่มีแสงเลเซอร์สองลำแทรกสอดกับบริเวณผิวหน้าผลึก	42
4.2 แสดงการทดลองดูปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรคทีฟ	43
4.3 การเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรคทีฟ	43
4.4 การจัดอุปกรณ์แบบ อินไลน์	50
4.5 แสดงกราฟของความเข้มแสงที่ลดลงต่อเวลา	57
4.6 แสดงริ้วเกรตติงที่เกิดขึ้นในผลึกลิเทียมไนโอเบต	59
5.1 แสดงริ้วเกรตติงที่เกิดขึ้นในผลึกลิเทียมไนโอเบต	61



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
PRCs	Photorefractive Crystals
HI	Holographic Interferometry
RT	Real-Time
LiNbO <sub>3</sub>	Lithium niobate
BE	Beam Expander
M1,M2,M3	Mirror 1,2,3
L1,L2L3	Lens 1,2,3
BS	Beam Splitter
nm	Nanometer
mm	Millimeter
nW	Nano-Watt
μW	Micro-Watt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟเป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้ดัชนีหักเหแสงในตัวกลางเปลี่ยนเนื่องจากความเข้มแสงที่ผ่านเข้ามาในพื้นที่ว่างของตัวกลาง ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เมื่อ ในปี ค.ศ. 1966 Ashkin *et. al.* ได้ค้นพบเป็นครั้งแรก ในผลึกลิเทียมไนโอเบต ( $\text{LiNbO}_3$ ) โดยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการส่องผ่านของลำแสงเลเซอร์ ซึ่งเป็นแสงที่มีคุณสมบัติความเป็นโคฮีเรนต์ (Coherent light) ผ่านผลึกแบบบิเล็กโทรออปติกส์จนกระทั่งในปี 1990 ดร. Moerner ซึ่งได้สร้างผลึกพอลิเมอร์ขึ้นสำเร็จเป็นครั้งแรกของโลก โดยใช้สาร 2-(cyclooctylamino)-5-nitropyridine (COANP) เจือโดยสาร 7,7,8,8-tetracyanoquinodimethane ซึ่งเรื่องนี้ก็ได้มีการศึกษามาอย่างต่อเนื่อง เพราะว่าสารพอลิเมอร์มีประสิทธิภาพสูงและสามารถสร้างเป็นผลึกได้ง่ายกว่าสารทั่วไป นอกจากนั้นได้มีการทดลองและสังเกตรวมปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟในตัวกลางจำนวนมากยกตัวอย่างเช่น ลิเทียมไนโอเบต ( $\text{LiNbO}_3$ ) แบเรียมไททาเนต ( $\text{BaTiO}_3$ ) แกลเลียมอาเซนไนด์ (GaAs) แคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) อินเดียมฟอสไฟด์ (InP) วัสดุบ่อศักย์ควอนตัมแบบหลายบ่อ (Multi quantum well materials) และวัสดุออร์แกนิก (Organic material) หรือ พอลิเมอร์บางชนิด

ปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟจะเกิดขึ้นเมื่อทำการฉายแสงเลเซอร์ผ่านเข้าไปยังตัวแยกแสง (beam splitter) ก็จะเกิดการแยกลำแสงเป็น 2 ลำ โดยลำแสงทั้ง 2 ลำจะเกิดการแทรกสอดกัน (interference) กันภายในผลึกและทำให้เกิดแถบมืด-สว่างเกิดขึ้น ซึ่งส่วนนั้นเองทำให้เกิดค่าดัชนีหักเหเกรตติ้ง (refractive index-grating) ขึ้น โดยเกรตติ้งจะเกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุพาหะเคลื่อนที่จากแถบมืดไปยังแถบสว่าง เมื่อเคลื่อนที่แล้วประจุลบจะไปอยู่ที่แถบสว่าง ส่วนประจุบวกจะเคลื่อนที่ไปยังแถบมืด จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหขึ้นในผลึกแบบเป็นคาบ เมื่อมุมที่ตกกระทบของลำแสงมีค่าเปลี่ยนแปลงไป จะทำให้มีผลต่อความกว้างของแถบการแทรกสอดที่เกิดขึ้น

นอกจากนี้ในกระบวนการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟยังมีการถ่ายโอนพลังงานระหว่างลำแสงที่เดินทางในผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านแสงจำนวนมาก เช่น การเกิดเฟสคอนจูเกต (Phase conjugate) ความสัมพันธ์ทางแสง (Optical correlation) พลวัตฮอโลกราฟี (Dynamic holography) การตรวจสอบลักษณะของคลื่นแสง (Optical pattern recognition) ตัวแปลงเชิงแสง (Optical convertor) และการประยุกต์ใช้ด้านอื่น ๆ

โครงการพิเศษนี้มีความสนใจที่จะศึกษาคุณสมบัติของผลึกลิเทียมไนโอเบตและการนำผลึกลิเทียมไนโอเบตไปประยุกต์ทางด้านแสงต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาปรากฏการณ์โพโตรีแฟรกทีฟในผลึกลิเทียมไนโอเบต
- 2) ศึกษาการบันทึกภาพ Holography ด้วยผลึกลิเทียมไนโอเบต
- 3) นำมาประยุกต์ใช้งานที่เกี่ยวกับทางด้าน Dynamic Holography Interferometer

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาปรากฏการณ์โพโตรีแฟรกทีฟ
- 2) ศึกษาการประยุกต์ใช้งานและนำไปใช้งาน
- 3) ทำการวิเคราะห์ผลที่ได้

## 1.4 แนวทางการดำเนินงาน

โครงการนี้มีระยะเวลาในการจัดทำทั้งสิ้น 12 เดือนโดยเริ่มตั้งแต่เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2558 จนถึง เดือน พฤษภาคม พ.ศ.2559 ซึ่งถูกนำมาแสดงระยะเวลาการดำเนินงานได้ดังตารางที่ 1.1 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1.1 แนวทางการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ช่วงเวลา
1.ศึกษาปรากฏการณ์โพโตรีแฟรกทีฟ	มิถุนายน ถึง กันยายน
2.ศึกษาการประยุกต์ใช้ทางด้านแสง	ตุลาคม ถึง พฤศจิกายน
3.ทำการทดลอง	ธันวาคม ถึง มีนาคม
4.วิเคราะห์ผล และ สรุปผลการทดลอง	เมษายน ถึง พฤษภาคม

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถอธิบายปรากฏการณ์โพโตรีแฟรกทีฟได้
- 2) สามารถอธิบายการประยุกต์ใช้ของผลึกลิเทียมไนโอเบตได้
- 3) สามารถนำผลึกไปประยุกต์ใช้ทางด้านแสงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

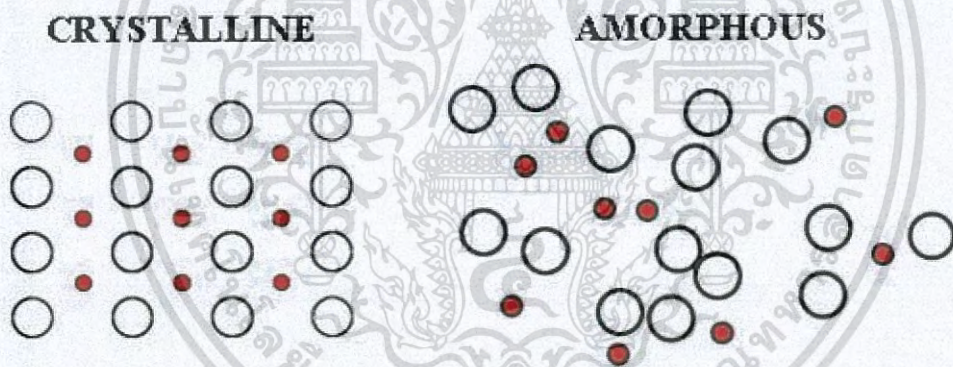
#### 2.1 โครงสร้างผลึก

##### 2.1.1 การเรียงตัวของอะตอมของผลึก

การจัดเรียงตัวของอะตอมของผลึกจะมีอยู่ 2 แบบ คือ

1. การจัดเรียงตัวแบบเป็นผลึก (Crystalline material) คือ อะตอมจะมีการจัดเรียงตัวอย่างมีระเบียบในทุกระนาบของผลึก
2. การจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นผลึก (Noncrystalline material) คือ อะตอมจะมีการจัดเรียงตัวแบบมีระเบียบ แต่จะเป็นบางส่วนของผลึก ซึ่งจะเรียกว่า amorphous

ซึ่งในผลึกที่เราใช้ในการศึกษาและทดลองนั้นเป็นการจัดเรียงตัวแบบเป็นผลึกซึ่งผลึกก็จะมีคุณสมบัติคือ อะตอมจะมีการจัดเรียงตัวแบบเรขาคณิตในระบบสามมิติ ผลึกจะมีการจัดเรียงตัวแบบซ้ำในโครงสร้างผลึก ซึ่งเป็นจุดเล็กๆมาเรียงตัวกันแบบซ้ำ จุดเล็กนั้นจะเรียกว่า แลตทิซ (lattice point) ซึ่งแลตทิซนั้นจะจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างระหว่างวัตถุที่เป็นผลึก (Crystalline) และไม่เป็นผลึก (Amorphous)

ที่มา :

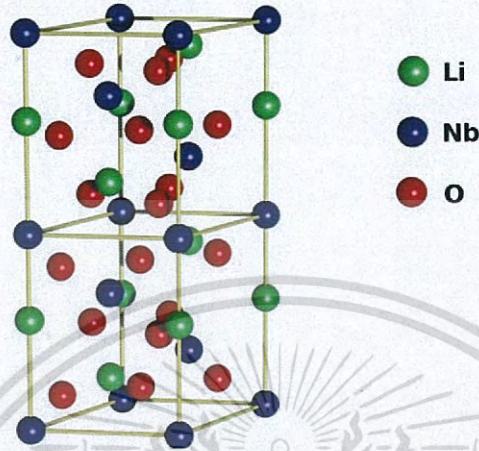
[http://academic.brooklyn.cuny.edu/geology/leveson/core/graphics/crystals/crystals\\_cause.html](http://academic.brooklyn.cuny.edu/geology/leveson/core/graphics/crystals/crystals_cause.html)

##### 2.1.2 รูปแบบของผลึก

ในโครงสร้างยังมีรูปแบบของผลึกอยู่ ซึ่งเรียกว่า สเปซ แลตทิซ (space lattice) ซึ่งจะมีอยู่หลากหลายรูปแบบ แต่จะสรุปโดยรวมนะจะมีอยู่ 7 แบบด้วยกัน คือ ไตรคลินิก (Triclinic), โมโนคลินิก (Monoclinic), ออร์โธรอมบิก (Orthorhombic) หรือ โอห์มบิก (Rhombic), เตตราโกนอล (Tetragonal), โอห์บอฮีดรอล (Rhombohedral), เฮกซะโกนอล (Hexagonal) และคิวบิกหรือลูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บาศก์ (Cubic) ซึ่งในผลึกลิเทียมไนโอเบต ( $\text{LiNbO}_3$ ) ที่เราใช้ในการศึกษาและทดลองนั้น จะเป็นแบบ ไตรโกนอล (Trigonal,  $3m$ ) หรือเป็นรูปพีระมิดฐานสามเหลี่ยม ซึ่งจะเป็นส่วนที่ย่อยมาจากเอกซะโกนอล ซึ่งจะมีรูปดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของผลึกลิเทียมไนโอเบตซึ่งเป็นแบบ trigonal,  $3m$

ที่มา : [https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium\\_niobate#/media/File:Linbo3\\_Unit\\_Cell.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_niobate#/media/File:Linbo3_Unit_Cell.png)

เนื่องจากผลึกลิเทียมไนโอเบตเป็นแบบพีระมิดฐานสามเหลี่ยม จึงให้ระนาบในผลึกนั้นไม่สามารถเป็นแบบ  $[1,1,1]$  ได้ ถ้าหากระนาบในผลึกเป็นแบบ  $[1,1,1]$  จะส่งผลให้ปรากฏการณ์ต่างๆ สามารถศึกษาได้ทุกหน้าของผลึก จะไม่มีหน้าใดในผลึกไม่ปรากฏผลออกมา

### 2.1.3 คุณสมบัติของผลึกลิเทียมไนโอเบต

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของผลึกลิเทียมไนโอเบต

คุณสมบัติ	
สูตรทางเคมี (Chemical formula)	$\text{LiNbO}_3$
น้ำหนักมวล (Molar mass)	147.846 g/mol
ลักษณะ (Appearance)	ของแข็ง สีน้ำตาล
ความหนาแน่น (Density)	$4.64 \text{ g/cm}^3$
จุดหลอมเหลว (Melting point)	$1,255^\circ\text{C}$ ( $2,291^\circ\text{F}$ , $1,528 \text{ K}$ )
แถบพลังงาน (Band gap)	4 eV
ดัชนีหักเห (Refractive index)	$n_o=2.29$ , $n_e=2.2$
โครงสร้างผลึก (Crystal structure)	Trigonal, $3m$
ค่าคงที่ตัวต้านทานไฟฟ้า (Dielectric constant)	$\epsilon_{11}=85$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	$\epsilon_{33}=30$
สัมประสิทธิ์ของอิเล็กโทรออปติก (Electrooptical coefficient @ $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ )	$r_{33}=32 \text{ pm/V}$ $r_{22}=6.8 \text{ pm/V}$ $r_{31}=10 \text{ pm/V}$

ซึ่งผลึกชนิดนี้เป็นผลึกที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุ Electrooptic, Non-linear optic, Optical waveguide และ Optical modulators ซึ่งผลึกลิเทียมไนโอเบตเป็นผลึกแบบเพียร์โรอิเล็กทริก สามารถศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆ ได้มากในทางด้านแสง เช่น ปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกต (Phase conjugate), ปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ (Photorefractive), พลวัตโฮโลกราฟี (Dynamic Holography) และ อะคูสโตออปติก (Acousto-optic)

#### 2.1.4 กลุ่มของผลึกและการเลือกผลึกในการใช้งาน

มีกลุ่มของผลึกที่ใช้งานทั้งหมดหลักๆ 3 กลุ่มคือ เพียร์โรอิเล็กทริก, เซเลไนต์และ สารกึ่งตัวนำสองกลุ่มแรกเป็นพวกที่ตอบสนองได้ไวในย่านแสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าส่วนกลุ่มสุดท้ายจะตอบสนองที่ย่านใกล้กับอินฟราเรด

กลุ่มแรกคือ กลุ่มผลึกเพียร์โรอิเล็กทริก โดยทั่วไปกลุ่มนี้จะถูกพิจารณาให้เป็นกลุ่มที่มีประสิทธิภาพแต่มีการตอบสนองที่ไม่ค่อยดีผลึกในกลุ่มนี้จะมีดังเช่น ผลึกลิเทียมไนโอเบต, โปแทสเซียมไนโอเบตแบบเรียบมีทาเนต ซึ่งเป็นผลึกตัวหลักๆในกลุ่มนี้การเคลื่อนย้ายเชิงกลโดยพื้นฐานเป็นแบบโพโตโวลตาอิกแต่ก็มีอีกสองรูปแบบที่สามารถใช้ได้คือแบบการกระจายพาหะและแบบพาหะอิสระการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเห  $\Delta n_{\text{sat}}$  จะอยู่บนช่วง  $10^{-3}-10^{-5}$

กลุ่มที่สองคือกลุ่มของผลึกเซเลไนต์ ในกลุ่มนี้จะประกอบไปด้วยสามรูปแบบของสารผสมคือ  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  (BSO)  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  (BGO) และ  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  (BTO) ในกลุ่มนี้จะมีการตอบสนองแบบต่างๆในย่านสีน้ำเงินถึงเขียวเป็นหลักแต่สามารถที่จะยืดช่วงออกไปได้ถึงสีแดงสำหรับ BTO และ BGO ที่เจอสารการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเห  $\Delta n_{\text{sat}}$  จะมีค่าน้อยกว่าในกรณีของ เพียร์โรอิเล็กทริกคือ  $10^{-6} - 5 \cdot 10^{-6}$

กลุ่มสุดท้ายเป็นกลุ่มของสารกึ่งตัวนำ (CdTe, AsGa, etc.) ค่าการตอบสนองของผลึกในกลุ่มนี้จะอยู่ที่ราวๆ 1 ไมครอน ผลึกในกลุ่มนี้มีการตอบสนองที่มากกว่าผลึกเซเลไนต์แต่ในบางเวลาก็มีค่าเท่ากันหรือมีประสิทธิภาพมากกว่าการเขียนค่าจะขึ้นอยู่กับชนิดสาร  $14 \mu\text{J}/\text{cm}^2$  สำหรับ CdTe และ  $110 \text{ ไมครอน } \mu\text{J}/\text{cm}^2$  สำหรับ AsGa ค่า  $\Delta n_{\text{sat}}$  ที่เคยมีการรายงานออกมาแล้ว มีค่าที่มากกว่า  $10^{-6}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 แบบจำลองการเคลื่อนย้ายประจุระหว่างแถบพลังงาน

เมื่อแสงตกกระทบบนตัวกลางจะทำให้ประจุภายในตัวกลางกระจายตัวเมื่อประจุกระจายตัวจะทำให้เกิดการแบ่งเป็นประจุบวกกับประจุลบตามแถบมืด-สว่าง ซึ่งแถบมืดจะมีประจุลบเป็นส่วนใหญ่ ส่วนแถบสว่างจะมีประจุลบน้อย เนื่องจากประจุลบได้เคลื่อนที่จากแถบสว่างไปยังแถบมืดตามรูปที่ 2.1 กำหนดให้

$N_D$  คือความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้ในหน่วยอะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ( $\text{atom}/\text{cm}^3$ )

$N_D^+$  คือความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้เป็นไอออนในหน่วยอะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ( $\text{atom}/\text{cm}^3$ )

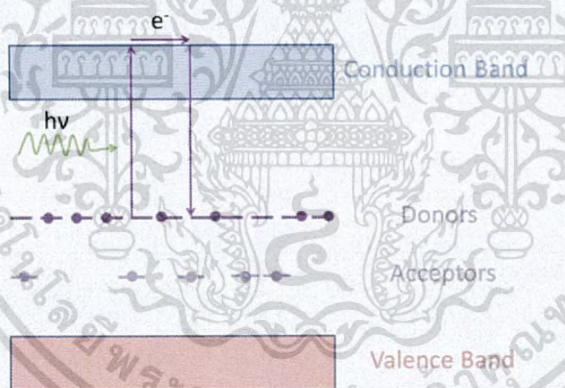
$N$  คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ ในหน่วยอะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ( $\text{atom}/\text{cm}^3$ )

$s$  คือภาพตัดขวางในตัวกลางจากการกระตุ้นด้วยแสง ในหน่วยตารางเซนติเมตร ( $\text{cm}^2$ )

$I$  คือความเข้มแสง ในหน่วยมิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ( $\text{mW}/\text{cm}^2$ )

$\beta$  คืออัตราการเกิดความร้อนของอิเล็กตรอน

$\gamma_R$  คืออัตราการรวมตัวกันใหม่ระหว่างกับดักที่เป็นไอออนกับอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.3 แสดงการดูดกลืนโฟตอนของอิเล็กตรอนเข้าสู่แถบนำกระแส ด้วยแบบจำลองการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟกทีฟ

จากการดูดกลืนโฟตอนของแสงด้วยสารเจือผู้ให้จะได้สมการอัตราการเกิดอิเล็กตรอนอิสระคือ  $(sI + \beta)(N_D - N_D^+)$  และเมื่ออิเล็กตรอนอิสระถูกจับกับสารเจือที่เป็นไอออน หรือ กับดัก (Trap) สามารถเขียนสมการอัตราการจับอิเล็กตรอนของกับดักคือ  $\gamma_R N_D N_D^+$  ส่วนสมการอัตราการเกิดความหนาแน่นไอออน  $N_D^+$  สามารถละเทอมการสร้างความร้อนไปได้ เพราะ  $\beta \ll sI$  ดังนั้นสามารถเขียนสมการการเกิดความหนาแน่นไอออน ดังสมการ

$$\frac{\partial N_D^i}{\partial t} = sI(N_D - N_D^i) - \gamma_R N N_D^i \quad (2.4)$$

สำหรับไอออนของสารเจือทั้งหมดที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา หรืออิเล็กตรอนจะถูกจับใหม่อีกครั้งเมื่อเติมสารเจือใหม่ลงในที่ว่างของตัวกลาง ดังนั้นอัตราการเกิดอิเล็กตรอนเท่ากับอัตราการเกิดไอออนของสารเจือ นอกจากนี้ว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในขณะที่สารเจืออยู่กับที่ไม่เกิดการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญสำหรับการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ และการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระอาจส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ดังนั้นสมการอัตราความหนาแน่นของอิเล็กตรอนคือ

$$\frac{\partial N}{\partial t} - \frac{\partial N_D^i}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot j \quad (2.5)$$

เมื่อ  $j$  คือ ความหนาแน่นกระแส ในหน่วยแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ( $A/cm^2$ )

$q$  คือ ประจุของอิเล็กตรอน ( $1.602 \times 10^{-19}$  คูลอมบ์)

จากสมการแสดงให้เห็นว่าประจุพาหะ(อิเล็กตรอน) ทำให้เกิดสนามที่ว่างประจุ (Space-charge field) ซึ่งส่งผลกระทบต่อเคลื่อนที่ของประจุพาหะ ดังนั้นความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอนประกอบด้วยส่วนที่เกิดจากการไหลของประจุพาหะเนื่องจากสนามไฟฟ้า และการแพร่กระจายเนื่องจากเกรเดียนต์ของความหนาแน่นประจุพาหะ สามารถเขียนสมการได้ ดังนี้

$$j = qN\mu E + k_B T \mu \nabla N \quad (2.6)$$

เมื่อ  $\mu$  คือ เทนเซอร์ความคล่องตัวอิเล็กตรอน ในหน่วยตารางเมตรต่อโวลต์-วินาที ( $m^2/V-s$ )

$E$  คือ สนามไฟฟ้า ในหน่วยนิวตันต่อคูลอมบ์ ( $N/C$ )

$k_B T$  คือ ผลคูณระหว่างค่าคงตัวโบลต์ซมันน์กับอุณหภูมิ ในหน่วยจูลต่อโมล ( $J/mol$ )

และอธิบายสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยใช้สมการของปัวซอง (Poisson's equation)

$$\nabla \cdot \epsilon E = \rho(r) = -q(N + N_A - N_D^i) \quad (2.7)$$

เมื่อ  $\epsilon$  คือสภาพความยอมทางไฟฟ้าของตัวกลางในหน่วยคูลอมบ์ต่อนิวตัน-เมตร ( $C/N-m$ )

$\rho(r)$  คือค่าความหนาแน่นประจุ ในหน่วยคูลอมบ์ต่อลูกบาศก์เมตร ( $C/m^3$ )

$N_A$  คือความหนาแน่นของสารเจือผู้รับในหน่วยอะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ( $atom/cm^3$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะวิธีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสารเจือผู้รับ (Acceptor impurity) มีความสำคัญต่อความเป็นกลางทางไฟฟ้าของประจุ ในกรณีที่  
ไม่มีการส่องสว่างแสง ความเป็นกลางของประจุสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$(N + N_A - N_D^i) = 0 \quad (2.8)$$

ในกรณีที่ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยมาก ทำให้  $N_D^i = N_A$  ในสภาวะที่ไม่มีแสง หรือ  
ความเข้มของสารเจือผู้ให้ เท่ากับ ความหนาแน่นของสารเจือผู้รับ จากสมการ (2.6) เทอมแรก  
( $qN\mu E$ ) แสดงถึงความหนาแน่นกระแสจากการไหลของประจุพาหะเนื่องจากสนามไฟฟ้า และเทอมที่  
สอง ( $k_B T \mu \nabla N$ ) แสดงถึงความหนาแน่นกระแสจากการแพร่กระจายเนื่องจากเกรเดียนต์ ของประจุ  
แต่ในกรณีนี้เราไม่พิจารณากระแสเนื่องจากปรากฏการณ์โฟโตวอลเทจิก (Photovoltaic effect)  
เนื่องจากมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกระแสที่เกิดจากประจุพาหะ รูปที่ 2.1 ประกอบด้วยสารเจือผู้ให้  
และสารเจือผู้รับ โดยปกติความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้จะมากกว่าความหนาแน่นของสารเจือผู้รับ  
และสมมติว่าสารเจือทั้งหมดเหมือนกัน ในกรณีที่ไม่มีอิเล็กตรอนในแถบนำกระแส และไม่มีโฮลใน  
แถบวาเลนซ์ ความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้ที่เป็นไอออนจะเท่ากับสารเจือผู้รับ ซึ่งสารเจือผู้ให้ที่เป็น  
กลางสามารถให้อิเล็กตรอนจากการกระตุ้นด้วยแสง (Photonexcitation) และไอออนของสารเจือ  
ผู้ให้จำนวนหนึ่งสามารถจับกับโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) ในแบบจำลองนี้สารเจือผู้รับมี  
หน้าที่เพียงทำให้ประจุเป็นกลางทางไฟฟ้า ไม่ได้มีผลโดยตรงต่อกระบวนการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรี  
แฟรกทีฟ ในส่วนนี้เราจะพิจารณาการที่แสงเลเซอร์ 2 ลำเดินทางเข้าสู่ตัวกลางโฟโตรีแฟรกทีฟ เขียน  
สมการสนามไฟฟ้าได้ดังนี้

$$E = E_a \exp(i\omega t - ik_a \cdot r) + E_b \exp(i\omega t - ik_b \cdot r) \quad (2.9)$$

สมมติให้ความถี่ของแสงเลเซอร์ 2 ลำเท่ากัน เมื่อ  $E_a, E_b$  คือแอมพลิจูดสนามไฟฟ้าของคลื่น  $k_a, k_b$   
คือ เวกเตอร์คลื่น ถ้าสถานะการโพลาไรซ์ของคลื่นแสงทั้ง 2 ลำไม่ตั้งฉากกัน ดังนั้นสามารถเขียน  
รูปแบบลักษณะการแทรกสอดของคลื่นด้วยความเข้มแสง

$$I(r) = I_0 + \text{Re}\{I_1 e^{-ik \cdot r}\} \quad (2.10)$$

$$I_0 = |E_a|^2 + |E_b|^2 \quad (2.11)$$

$$I_1 = 2E_b \cdot E_a^* \quad (2.12)$$

และ  $K$  คือเวกเตอร์คลื่นเกรตติง (Grating wave vector)

$$K = k_b - k_a \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของเวกเตอร์คลื่นเกรตติงสัมพันธ์กับคาบ ( $\Lambda$ ) ของรูปแบบการแทรกสอดของลำแสง

$$K = 2\pi/\Lambda \quad (2.14)$$

ซึ่งเวกเตอร์คลื่นเกรตติงมีค่าสูงสุดเมื่อคลื่นทั้ง 2 มีการโพลาไรซ์ในทิศทางเดียวกันและมีขนาดเท่ากัน คือ  $E_a = E_b$  ดังนั้นความเข้มของแสงในกรณีนี้คือ

$$I = I_0 (1 + \cos K \cdot r) \quad (2.15)$$

จากสมการแสดงถึงแอมพลิจูดของการแทรกสอด และแอมพลิจูดเกิดขึ้นที่  $K \cdot r = (2m + 1)\pi$  เมื่อความเข้มแสง  $I = 0$

พิจารณาขณะที่ส่องสว่างลำแสงเลเซอร์เข้าสู่ตัวกลางโฟโตรีแฟรกทีฟ บริเวณที่มีความสว่างค่า  $\cos K \cdot r$  เข้าใกล้ 1 และ  $I$  เท่ากับ  $2I_0$  ซึ่งประจุที่แตกตัวเป็นไอออน (Photoionized charge) เกิดจากการดูดกลืนโฟตอน (Photon) และพาหะประจุเหล่านั้น หรืออิเล็กตรอนสามารถกระจายออกไปบริเวณที่มีความสว่าง สิ่งที่เหลืออยู่คือสารเจือผู้ให้ที่แตกตัวเป็นไอออน ถ้าพาหะประจุเหล่านั้นถูกจับในบริเวณที่ไม่มีแสงสว่าง ประจุจะไม่แตกตัวเพราะไม่มีแสงสว่างมากระตุ้น โดยแสดงการแยกประจุดังรูปที่ 2.2 ผลจากการส่องสว่างแสงที่มีความเป็นโคฮีเรนต์ลงบนตัวกลางโฟโตรีแฟรกทีฟ บริเวณที่ไม่มีแสงสว่างประจุจะเป็นลบ ส่วนบริเวณที่มีความสว่างประจุจะเป็นบวก โดยการแยกที่ว่างประจุ (Space-charge) เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งการกระจายของกระแส (Diffusion current) สมดุลกับการไหลของกระแส (Drift current) ซึ่งองค์ประกอบพื้นฐานของความหนาแน่นที่ว่างประจุ (Space-charge density) สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\rho = \rho_0 \cos K \cdot r \quad (2.16)$$

เมื่อ  $\rho_0$  คือค่าคงตัว และทำการอินทิเกรตสมการของปัวส์ซงจากสมการที่ ( 2.7 ) จะได้

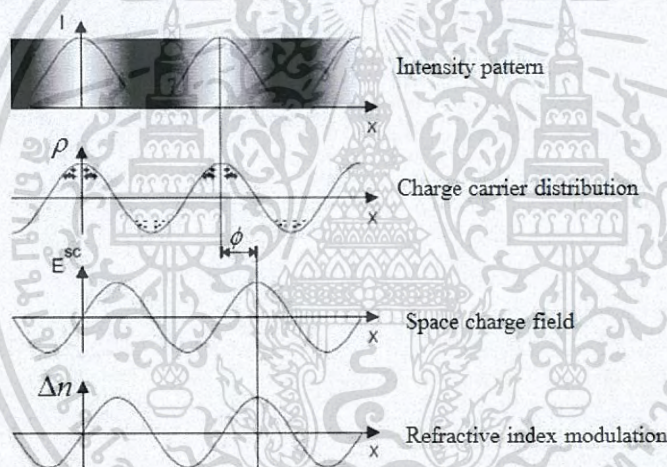
$$E = \rho_0 \frac{K}{K \cdot \epsilon K} \sin (K \cdot r) \quad (2.17)$$

เราทราบว่าสนามที่ว่างประจุเฟสถูกเลื่อนไปตำแหน่งที่ว่าง  $\pi/2$  หรือ 90 องศา สัมพันธ์กับความเข้มแสง และสนามที่ว่างประจุนี้ไปเหนี่ยวนำให้ค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลางเปลี่ยนแปลง ตามปรากฏการณ์ของพอคเกิลส์ (Pockel' effect) รูปที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ของความเข้มแสง ความหนาแน่นของที่ว่างประจุ สนามที่ว่างประจุ และการเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหแสงจากการถูกเหนี่ยวนำด้วยที่ว่างประจุเหล่านั้น การกระจายตัวของประจุจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้าขึ้นภายในตัวกลางเมื่อสนามไฟฟ้าในตัวกลางเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเฟสขึ้น การเปลี่ยนแปลงเฟสนั้นก็จะส่งผลให้เกิดค่าดัชนีหักเหที่เปลี่ยนแปลงภายในตัวกลางซึ่งการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหเหล่านั้นจะเรียกได้ว่า ดัชนีหักเหเกรตติง ดังนั้นจึงสามารถสรุปกระบวนการพื้นฐานในการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟร็กในผลึกแบบอเล็กโทรอปติกส์ (Electro-optic) ประกอบด้วย 5 กระบวนการ คือ

1. การเกิดไอออนจากการดูดกลืนโฟตอน (Photoionization) ของสารเจือผู้ให้ และเกิดประจุพาหะหรืออิเล็กตรอนอิสระ
2. การเคลื่อนที่ของประจุพาหะ ตามแถบการแทรกสอดของลำแสง
3. การจับประจุพาหะ และสร้างความหนาแน่นของที่ว่างประจุ
4. การสร้างสนามไฟฟ้าของที่ว่างประจุ จากการเหนี่ยวนำด้วยแสง
5. การสร้างดัชนีเกรตติง ซึ่งเป็นปรากฏการณ์แบบเชิงเส้นในผลึกแบบอเล็กโทรอปติกส์



รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการสร้างดัชนีเกรตติงด้วยการแทรกสอดของคู่ลำแสงตกกระทบที่มีความเข้มแสงแบบเป็นคาบลงบนตัวกลางแบบอเล็กโทรอปติกส์

ปรากฏการณ์โฟตรีแฟร็กทีฟเป็นปรากฏการณ์ที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าและต้องเกิดประจุพาหะ และการกระจายของประจุพาหะจำนวนมาก โดยปกติความหนาแน่นของประจุพาหะอยู่ในระดับ  $10^{15}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ( $\text{cm}^{-3}$ ) ใช้ความเข้มการส่องสว่างในสมการที่ (2.10) เพื่อหาค่าสนามที่ว่างประจุในฟังก์ชัน  $r$  และ  $t$  โดยใช้สมการ (2.4) และ (2.7) ซึ่งสมการคำตอบแบบปิดโดยทั่วไปไม่สามารถใช้ได้สำหรับกรณีนี้ ดังนั้นจึงอธิบายประจุพาหะที่สถานะคงตัว โดยกำหนดให้เวลา ( $t$ ) ในการดิฟเฟอเรนเชียล เท่ากับ 0 จะได้สมการที่สถานะคงตัวตามสมการ (2.4) และ (2.7) คือ

$$sI(N_A - N_D^i) - \gamma_R N N_D^i = 0 \quad \nabla \cdot j = 0$$

$$j = qN\mu E + k_B T \mu \nabla N$$

$$\nabla \cdot \epsilon E = \rho(r) = -q(N + N_A - N_D^i) \quad (2.18)$$

ใช้สมการเหล่านี้เพื่อหาผลเฉลยของสมการสนามไฟฟ้า ( $E$ ) ในเทอมของความเข้มแสง  $I(r)$  ดังนั้นสมการคำตอบแบบปิดสามารถใช้ในกรณีที่มีความเข้มแสงในการกระตุ้นประจุพาหะมีค่าน้อยมาก กล่าวคือ  $|I_1| \ll I_0$  จากข้อสมมุติฐานดังกล่าวสามารถละเทอมฮาร์มอนิกอันดับที่สูงกว่าได้ และสามารถเขียนสมการที่สถานะคงตัวได้ ดังนี้

$$N(r) = N_0 + \text{Re}\{N_1 e^{-ik \cdot r}\} \quad (2.19)$$

$$N_D^i(r) = N_{D0}^i + \text{Re}\{N_{D1}^i e^{-ik \cdot r}\} \quad (2.20)$$

$$j(r) = j_0 + \text{Re}\{j_1 e^{-ik \cdot r}\} \quad (2.21)$$

$$E(r) = E_0 + \text{Re}\{E_1 e^{-ik \cdot r}\} \quad (2.22)$$

เมื่อ  $N_0, N_{D0}^i, j_0, E_0, N_1, N_{D1}^i, j_1, E_1$  คือ ค่าคงตัว ปัญหาคือเราต้องแก้สมการสำหรับค่าคงตัวเหล่านี้ในเทอมของ  $I_0$  และ  $I_1$  ดังนั้นจะแก้สมการเพื่อหาปริมาณทางฟิสิกส์เหล่านี้ โดยเริ่มพิจารณาจากกรณี  $I_1$  เท่ากับ 0 ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อส่องสว่างลำแสง 1 ลำแบบสม่ำเสมอ (Uniform illumination) หรือลำแสง 2 ลำด้วยแกนโพลาไรซ์ตั้งฉากกัน ดังนั้นความเข้มแสง  $I_1 = 2E_b \cdot E_a^* = 0$  และในกรณีที่ส่องสว่างลำแสงแบบความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงเป็นคาบ (Periodic intensity variation) การส่องแสงสามารถทำได้ 2 กรณีคือ

1. การส่องแสงแบบสม่ำเสมอ (Uniform illumination:  $I_1 = 0$ ) กรณีนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ของปริมาณทางฟิสิกส์ทั้งหมดเช่นแสงจากแหล่งกำเนิดแสงขาวปกติ ดังนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ของความหนาแน่นประจุพาหะคือ

$$sI(N_D - N_D^i) = \gamma_R N N_D^i \quad (2.23)$$

$$(N + N_A - N_D^i) = 0 \quad (2.24)$$

สมการทั้ง 2 สามารถใช้เพื่อหาตัวแปรที่ไม่ทราบค่า คือ  $N$  และ  $N_D^i$  จากสมการ (2.23) ได้รับความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้ที่แตกตัวเป็นไอออน ( $N_D^i$ )

$$N_D^i = \frac{N_D s I}{sI + \gamma_R N} \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้ที่แตกตัวเป็นไอออน ( $N_D^i$ ) นี้ ต้องเกิดจากการส่องสว่างแสงแบบสม่ำเสมอ เมื่อแทนสมการ (2.25) ลงในสมการ (2.24) จะได้สมการกำลังสองสำหรับค่า  $N$

$$\gamma_R N^2 + (sI + \gamma_R N_A)N + sI(N_A - N_D) = 0 \quad (2.26)$$

จากสมการสามารถหาคำตอบเพื่อหาค่า  $N$  ได้ ถ้าสมมุติว่าค่า  $N \ll N_A$  และ  $sI \ll \gamma_R N_A$  ดังนั้นคำตอบของสมการ คือ

$$N = \frac{N_D - N_A}{\gamma_R N_A} sI \quad (2.27)$$

ซึ่งความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจะต้องส่องสว่างด้วยความเข้มแสง ( $I$ ) ที่สม่ำเสมอ ดังนั้นสามารถหาค่าความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้ที่แตกตัวเป็นไอออน ( $N_D^i$ ) ดังสมการ

$$N_D^i = N_A + \frac{N_D - N_A}{\gamma_R N_A} sI \quad (2.28)$$

2. การส่องสว่างแสงแบบเป็นคาบ (Periodic illumination :  $I_1 \neq 0$ ) พิจารณาในกรณีการส่องสว่างแสงแบบเป็นคาบ ๆ ความเข้มแสง  $I_1 \neq 0$  ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อแสงแบบโคฮีเรนต์ 2 ลำตัดกันภายในตัวกลางเช่น แสงเลเซอร์ เมื่อแทนสมการ (2.31) ถึง (2.34) และพิจารณาเฉพาะเทอมของฮาร์โมนิกอันดับแรกเท่านั้น จะได้ระบบสมการดังนี้

$$sI_1(N_D - N_{D0}^i) + sI_0(-N_{D1}^i) - \gamma_R N_1 N_{D0}^i - \gamma_R N_0 N_{D1}^i = 0 \quad (2.29)$$

$$sI_0(N_D - N_{D0}^i) - \gamma_R N_0 N_{D0}^i = 0 \quad (2.30)$$

$$K \cdot (qN_1 \mu E_0 + qN_0 \mu E_1 - ik_B T \mu KN_1) = 0 \quad (2.31)$$

$$-iK \cdot \epsilon E_1 = -q(N_1 - N_{D1}^i) \quad (2.32)$$

$$N_0 + N_A - N_{D0}^i = 0 \quad (2.33)$$

ในสมการเหล่านี้ตัวแปร  $N_A$ ,  $N_D$  และ  $E_0$  คือ ค่าคงตัว ส่วน  $N_0$  และ  $N_{D0}^i$  สามารถหาได้จากการแก้สมการที่ (2.30) และ (2.33) ซึ่งผลที่ได้เหมือนกับในสมการที่ (2.27) และ (2.28) ตามลำดับ ส่วนสมการที่เหลืออีก 3 สมการนำไปใช้หาค่า  $N_1$ ,  $N_{D1}^i$  และ  $E_1$  จากสมการแมกซ์เวลล์ข้อที่ 4 (Curl Maxwell equation) ในกรณีที่อยู่ในสถานะคงตัว  $\nabla \times E = 0$  ทำให้  $K \times E_1 = 0$  หมายความว่า  $E_1$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ  $K$  หลังจากหาคำนวณ และประมาณค่าของเทอมพีชคณิตต่าง ๆ ทำให้เราสามารถหาค่าสนามที่ว่างประจุได้ดังสมการ

$$E_1 = \frac{iK \frac{k_B T}{q} - \frac{K \cdot \mu E_0}{K(\mu)}}{1 + \frac{K^2}{k_D^2} + i \frac{qK \cdot \mu E_0}{k_B T k_D^2 (\mu)}} I_1 \quad (2.34)$$

เมื่อ

$$k_D^2 = \frac{q^2}{(\epsilon) k_B T} \frac{N_A}{N_D} (N_D - N_A) \quad (2.35)$$

และ  $\langle \epsilon \rangle$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกยังผล (Effective dielectric constant) (C/N-m)

$\langle \mu \rangle$  คือ ค่าความคล่องตัวยังผล (Effective mobility) ( $m^2/V-s$ )

$$\langle \epsilon \rangle = \frac{K \cdot \epsilon K}{K^2} \quad (2.36)$$

$$\langle \mu \rangle = \frac{K \cdot \mu K}{K^2} \quad (2.37)$$

เมื่อถึงสมการ (2.34) เราสามารถสันนิษฐานว่า  $\gamma_R N_A \gg s I_0$  และ  $N_D s I_0 \gg \gamma_R N_A^2$  นอกจากนี้สามารถประมาณได้ว่าความเข้มแสงที่ผ่านตัวกลางมีค่าน้อยกว่าความเข้มแสงตกกระทบมาก ๆ คือ  $I_1 \ll I_0$  ในกรณีนี้เมื่อสนามไฟฟ้ากระแสตรง ( $E_0$ ) มีค่าเท่ากับเวกเตอร์เกรตติง ( $K$ ) สามารถลดรูปสมการที่ (2.33) ได้เป็น

$$E_1 = \frac{iK \frac{k_B T}{q} - \frac{K \cdot E_0}{K}}{1 + \frac{K^2}{k_D^2} + i \frac{qK \cdot E_0}{k_B T k_D^2}} I_1 \quad (2.38)$$

และสามารถลดเทอมที่มีค่าสนามไฟฟ้าอยู่ กรณีที่  $E = 0$  ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่สนามไฟฟ้ากระจายอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นสนามที่ว่างประจุ (Space-charge field) สามารถลดรูปได้เป็น

$$E_1 = \frac{iK \frac{k_B T}{q}}{1 + \frac{K^2}{k_D^2}} I_1 \quad (2.39)$$

สมการทั้งสองใช้สำหรับหาค่าสนามที่ว่างประจุ เป็นสมการที่สำคัญเพื่อหาแบบจำลองการเคลื่อนย้ายประจุระหว่างแถบพลังงาน ซึ่ง  $K$  คือ เวกเตอร์คลื่นเกรตติง ค่า  $k_D$  หาได้จากสมการที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2.35) และทราบค่าเลขคลื่นของเดอบาย (Debye wave number) จากทฤษฎีสถานแม่เหล็กไฟฟ้าในพลาสมา อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ออกนอกฉากในสนามคูลอมบ์ (Coulomb field) ของประจุทดสอบด้วยระยะทาง  $\Lambda_D = 2\pi/k_D$  ซึ่งระยะทาง คือรัศมีฉากของเดอบายโดยอธิบายด้วยความสมดุลระหว่างพลังงานจลน์ความร้อน กับพลังงานไฟฟ้าสถิตของประจุพาหะเหล่านั้น ในกรณีนี้เมื่อ  $N_D \gg N_A$  ดังนั้นสามารถเขียนสมการ  $k_D$  จาก (2.35) ได้ใหม่เป็น

$$k_D^2 = \frac{q^2 N_A}{(\epsilon) k_B T} = \frac{q^2 N_{D0}}{(\epsilon) k_B T} \quad (2.40)$$

เมื่อ  $N_{D0}$  คือค่าความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้ที่แตกตัวเป็นไอออน ซึ่งประจุที่เป็นบวกสามารถจับกับอิเล็กตรอนได้

จากกรณีทั้ง 2 นี้ทำให้ทราบว่า การส่องแสงแบบกรณีที่ 2 จะสามารถทำให้เกิดการกระตุ้นประจุภายในผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟแล้วทำให้เกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟได้

### 2.3 การเดินทางของคลื่นแสงในตัวกลางแบบเป็นคาบ

หลาย ๆ ความสำคัญและปรากฏการณ์ที่มีประโยชน์ ซึ่งเกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟเนื่องจากการกระเจิงของแสงจากเกรตติง หรือภาพฮอโลแกรมที่เกิดขึ้นในผลึก ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวได้แก่ การผสมกันของคลื่น (Wave mixing) การเกิดเฟสคอนจูเกต (Phase conjugate) ไดนามิกฮอโลกราฟี (Dynamic holography) และอื่น ๆ โดยเกรตติงหรือภาพฮอโลแกรมในตัวกลางเหล่านี้แสดงได้จากการเปลี่ยนแปลงแบบเป็นคาบของดัชนีการหักเหแสง ซึ่งคุณสมบัติทั่วไปของการเดินทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางแบบเป็นคาบ ๆ โดยเริ่มพิจารณาจากหลักการพื้นฐานการกระเจิงของแบรกก์ (Bragg scattering) และการอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัม โดยทั่วไปตัวกลางแบบเป็นคาบจะมีโครงสร้างใด ๆ ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กทริก การสะท้อนแบบสมมาตรเป็นฟังก์ชันแบบคาบของตำแหน่ง

$$\epsilon(x) = \epsilon(x + a) \quad (2.41)$$

เมื่อ  $a$  คือเวกเตอร์คงตัว ในกรณีของตัวกลางที่เป็นคาบแบบ 1 มิติ เขียนสมการ (2.41) ได้เป็น

$$\epsilon(z) = \epsilon(z + \Lambda) \quad (2.42)$$

หรือ

$$n^2(z) = n^2(z + \Lambda) \quad (2.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $z$  คือตัวชี้วัดตำแหน่ง และ  $\Lambda$  คือคาบ ตามความหมายโดยทั่วไปตัวกลางแบบเป็นคาบหมายถึงเฟสเกรตติง (Phase grating) ซึ่งประกอบด้วยแผ่นกระจกบาง ๆ ที่มีแถวของช่องว่างระยะห่างเท่า ๆ กันขนานกัน เกรตติงสะท้อน (Reflecting grating) ประกอบด้วยผิวโลหะแบนที่มีแถวของช่องว่างระยะห่างเท่า ๆ กันขนานกัน ฮอโลแกรมแบบปริมาตร (Volume hologram) ประกอบด้วยตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยดัชนีการหักเหแสงถูกเปลี่ยนเป็นคาบ ซึ่งแถวระนาบสามมิติเป็นคาบของอะตอม เช่น ตัวกลางที่เป็นผลึก วัสดุโฟโตรีแฟรกทีฟสามารถเป็นตัวกลางแบบเป็นคาบได้ด้วยการเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลางแบบเป็นช่วง ๆ ซึ่งทำได้โดยการส่องสว่างแสงด้วยความเข้มแสงที่มีความเป็นโคฮีเรนต์ลงบนพื้นที่ตัวกลาง ดังนั้นสามารถเขียนค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลางแบบเป็นคาบได้ดังสมการ

$$n(z) = n_0 + n_1 p(z) \quad (2.44)$$

เมื่อ  $n_0$  และ  $n_1$  คือ ค่าคงตัว และ  $p(z)$  คือ ฟังก์ชันแบบเป็นคาบของ  $z$

$$p(z) = p(z + \Lambda) \quad (2.45)$$

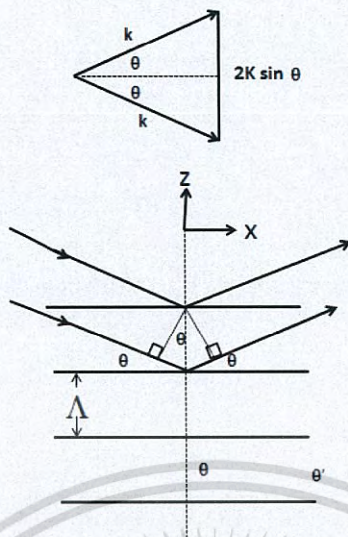
โดย

$$\max\{|p(z)|\} = 1 \quad (2.46)$$

และ

$$\int_0^\Lambda p(z) dz = 0 \quad (2.47)$$

ในสมการที่ (2.44) ค่า  $n_0$  คือดัชนีการหักเหแสงของวัสดุเมื่อไม่มีการกระตุ้นด้วยแสง และ  $n_1$  คือค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลางเมื่อมีการส่องสว่างแสงเข้าไปในตัวกลาง หรืออาจเรียก  $n_1$  ว่าดัชนีมอดูเลตเชิงลึก โดยที่วัสดุโฟโตรีแฟรกทีฟเกือบทุกชนิดค่า  $n_1$  อยู่ในระดับ  $10^{-3}$  ถึง  $10^{-5}$  พิจารณาการกระเจิงของคลื่นระนาบแบบแสงเอกรงค์ (Monochromatic plane wave) จากตัวกลางแบบเป็นคาบ ดังแสดงในรูป 2.3 ซึ่งการศึกษาการกระเจิงดังกล่าวมีผลมาจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) ในของแข็ง โดยพิจารณาเมื่อดัชนีมอดูเลตถูกรวมกันที่แถวของระนาบที่มีระยะเท่า ๆ กัน นอกจากนี้เราถือว่าระนาบเหล่านี้มีไม่จำกัด หรือมีจำนวนอนันต์ ดังนั้นการหักเหจากระนาบเป็นการสะท้อนเหมือนกับการสะท้อนจากกระจกเงา ที่มีมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน โดยแต่ละระนาบสะท้อนเพียงส่วนน้อยมาก ๆ ของคลื่นระนาบตกกระทบ ซึ่งแสงที่ถูกกระเจิงประกอบด้วยการซ้อนทับแบบเชิงเส้นของคลื่นระนาบที่ถูกหักเหเหล่านั้น ส่วนลำแสงเลี้ยวเบนเกิดเมื่อคลื่นระนาบที่ถูกสะท้อนเหล่านั้นเกิดขึ้น



รูปที่ 2.5 แสดงการกระเจิงของคลื่นระนาบจากแสงเอกรังคลื่นบนตัวกลางแบบเป็นคาบ

กำหนดให้  $\Lambda$  คือ ระยะระหว่างระนาบของคลื่น ซึ่งเป็นคาบของการเปลี่ยนดัชนีหักเหแสง ความแตกต่างเส้นทางของรังสีที่สะท้อนจากระนาบ 2 ระนาบที่อยู่ติดกันมีค่าเท่ากับ  $2\Lambda \sin \theta$  เมื่อ  $\theta$  คือ มุมระหว่างรังสีกับระนาบ และการแทรกสอดของคลื่นเกิดขึ้นเมื่อความแตกต่างของเส้นทางรังสีเป็นจำนวนเต็มของความยาวคลื่น  $\lambda/n$  ในตัวกลาง ดังนั้นสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$2\Lambda \sin \theta = N(\lambda/n) \quad (2.48)$$

เมื่อ  $n = n_0$  คือดัชนีหักเหแสงเฉลี่ยในที่ว่างของการหักเหแสงในตัวกลาง และ  $N$  คือ จำนวนเต็ม ซึ่งเป็นกฎการเลี้ยวเบนของแบรกก์ (Bragg diffraction) ถึงแม้การสะท้อนของรังสีแต่ละระนาบเป็นเหมือนการสะท้อนจากกระจกเงา แต่ลำแสงเลี้ยวเบนเกิดขึ้นเพียงค่าของมุมที่แน่นอน ( $\theta$ ) ตามหลักการเลี้ยวเบนของแบรกก์ ดังนั้นการสะท้อนจากระนาบทั้งหมดเกิดขึ้นเป็นระยะ จากสมการ (2.48) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$2k \sin \theta = N \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2.49)$$

เมื่อ  $k$  คือ เลขคลื่น (Wave number) ของลำแสงในตัวกลาง ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $n2\pi/\lambda$  ในเทอมของ  $2\pi/\Lambda$  เป็นค่าเลขคลื่นของเกรตติง ดังนั้นนิยมเขียนดังสมการ

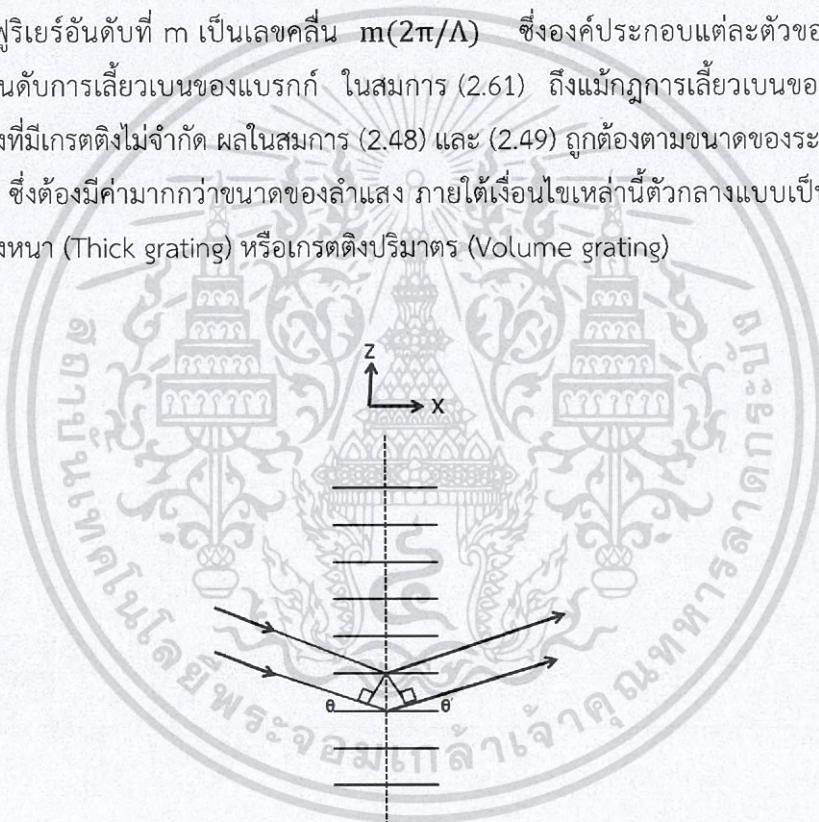
$$K = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2.50)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอมด้านซ้ายของสมการ (2.61)  $2k \sin \theta$  คือ การเปลี่ยนเวกเตอร์คลื่นเมื่อคลื่นเลี้ยวเบนจากตัวกลางแบบเป็นคาบ ดังนั้นจากหลักการเลี้ยวเบนของแบรกก์ สามารถตีความได้ว่าเป็นเพียงการอนุรักษ์โมเมนตัม เมื่อคลื่นเลี้ยวเบนจากตัวกลางแบบเป็นคาบ (Grating) จะเกิดการเปลี่ยนเวกเตอร์คลื่นคือ การเปลี่ยนจำนวนเต็มของเวกเตอร์คลื่นเกรตติงในความเป็นจริง ถ้าแยกฟังก์ชันคาบในสมการ (2.44) ลงในองค์ประกอบของฟูรีเยร์ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$n(z) = n_0 + n_1 \sum_m a_m \exp(-i \frac{2\pi}{\Lambda} mz) \quad (2.51)$$

เมื่อ  $a_m$  คือ องค์ประกอบฟูรีเยร์อันดับที่  $m$  ของการเปลี่ยนดัชนีหักเหแสงแบบเป็นคาบ โดยทราบว่า องค์ประกอบฟูรีเยร์อันดับที่  $m$  เป็นเลขคลื่น  $m(2\pi/\Lambda)$  ซึ่งองค์ประกอบแต่ละตัวของฟูรีเยร์กระจายตามอันดับการเลี้ยวเบนของแบรกก์ ในสมการ (2.61) ถึงแม้กฎการเลี้ยวเบนของแบรกก์อธิบายตัวกลางที่มีเกรตติงไม่จำกัด ผลในสมการ (2.48) และ (2.49) ถูกต้องตามขนาดของระนาบการหักเหเหล่านั้น ซึ่งต้องมีค่ามากกว่าขนาดของลำแสง ภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้ตัวกลางแบบเป็นคาบถูกเรียกว่าเกรตติงหนา (Thick grating) หรือเกรตติงปริมาตร (Volume grating)



รูปที่ 2.6 แสดงการเลี้ยวเบนแสงในตัวกลางแบบเป็นคาบจากเกรตติงแบบบาง

จากรูปที่ 2.6 เราพิจารณากรณีของเกรตติงบาง ๆ ซึ่งเกรตติงแบบนี้ขนาดตามขวางของการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหแสงแบบเป็นคาบขนาดค่อนข้างเล็กเมื่อเทียบกับขนาดของลำแสงหรือความยาวคลื่นของแสง เมื่อคลื่นระนาบตกกระทบบลงในตัวกลางแบบเป็นคาบ การเลี้ยวเบนของคลื่นแต่ละระนาบเกิดขึ้นจากการสะท้อนแบบการสะท้อนจากกระจกเงา ซึ่งการเลี้ยวเบนแสงแต่ละระนาบเหล่านี้เป็นผลมาจากขนาดที่จำกัดของระนาบ เนื่องจากระนาบที่จำกัดนี้ช่วยให้แสงที่กระเจิงถูกบังคับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

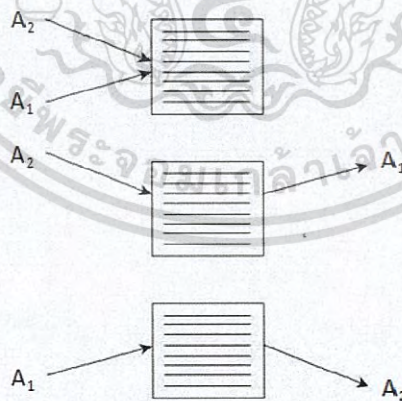
ตามมุม  $\theta'$  ซึ่งมีค่าแตกต่างจากมุมตกกระทบ  $\theta$  การใช้เหตุผลที่คล้ายกันในสมการที่ (2.48) ดังนั้นได้เงื่อนไขสำหรับสร้างการแทรกสอดของคลื่น

$$\Lambda \sin \theta + \Lambda \sin \theta' = N(\lambda/n) \quad (2.52)$$

เมื่อ  $N$  คือ จำนวนเต็ม จากสมการ (2.52) มีชุดของอันดับการเลี้ยวเบนแสงสำหรับมุมใด ๆ ของการตกกระทบ ซึ่งเป็นความแตกต่างระหว่างเกรตติงแบบบาง (Thin grating) และเกรตติงแบบหนา (Thick grating) โดยเกรตติงแบบหนามีเพียงการเลี้ยวเบนเพียงอันดับเดียว นอกจากนี้การเลี้ยวเบนเกิดขึ้นเพียงเมื่อมุมตกกระทบเป็นไปตามกฎของแบรกก์เท่านั้น

## 2.4 ปรากฏการณ์การผสมคลื่นในตัวกลางโพโตรีแฟรกทีฟ

เมื่อลำแสง 2 ลำของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติโคฮีเรนต์ตกกันภายในตัวกลางโพโตรีแฟรกทีฟ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงแบบเป็นคาบของความเข้มแสงเนื่องจากการแทรกสอดทำให้เกิดดัชนีเกรตติงแบบหนา (Volume index grating) ภายในตัวกลาง โดยเวกเตอร์คลื่นเกรตติง (Grating wave vector) ได้จาก  $K = \pm(k_2 - k_1)$  เมื่อ  $k_1$  และ  $k_2$  คือ เวกเตอร์คลื่นของลำแสงที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งการเกิดดัชนีเกรตติงมีผลต่อทิศทางการเคลื่อนที่ของลำแสงทั้ง 2 ลำในตัวกลาง ในความเป็นจริงคลื่นแสงเหล่านี้ถูกเลี้ยวเบนด้วยดัชนีเกรตติง จากการกระเจิงของแบรกก์เมื่อเฟสของคลื่นทั้ง 2 ตรงกันจะทำให้คลื่นทั้งสองสามารถแทรกสอดกันด้วย



รูปที่ 2.7 แสดงการกระเจิงของแบรกก์เนื่องจากเกรตติงแบบหนาในตัวกลางโพโตรีแฟรกทีฟ

จากรูปที่ 2.7 แสงลำที่ 1 ( $A_1$ ) กระเจิงด้วยดัชนีเกรตติง และเลี้ยวเบนไปตามทิศการเคลื่อนที่ของแสงลำที่ 2 ( $A_2$ ) ส่วนแสงลำที่ 2 ( $A_2$ ) กระเจิงด้วยดัชนีเกรตติงเดียวกัน และสร้างลำแสงเลี้ยวเบนเดินทางไปตามทิศการเคลื่อนที่ของแสงลำที่ 1 ( $A_1$ ) ซึ่งกระบวนการที่เกิดขึ้นนำไปสู่การดับปลิงพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Energy coupling) ระหว่างลำแสง และเกิดการกระเจิงการเลี้ยวเบนด้วยตัวเอง (Self-diffraction)

## 2.5 โฮโลแกรม (Hologram)

### 2.5.1 ประวัติและความเป็นมา

โฮโลแกรมนี้ถูกค้นพบโดยเดนนิส กาบอร์ (Dennis Gabor, 1900-1979) วิศวกรไฟฟ้าชาวฮังการี ในวันอีสเตอร์ ปี ค.ศ. 1947 โดยกาบอร์ได้ค้นพบหลักการของโฮโลกราฟีโดยบังเอิญ ในระหว่างที่พัฒนาปรับปรุงคุณภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่บริษัท British Thomson-Houston ที่เมือง Rugby ประเทศอังกฤษ จากการค้นพบนี้ กาบอร์ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ ในปี ค.ศ. 1971 เทคนิคที่คิดค้นเดิมยังใช้อยู่ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่เป็นที่ยุติกันในเรื่องภาพสามมิติอิเล็กตรอน แต่ภาพสามมิติเป็นเทคนิคแสงซึ่งไม่ได้มีการพัฒนาอย่างจริงจัง

จนกระทั่งมีการพัฒนาของเลเซอร์ในปี 1960 โฮโลแกรมแสงที่ใช้ได้จริงชิ้นแรกนั้นบันทึกอยู่ในรูปของวัตถุ 3D ซึ่งถูกสร้างขึ้นในปี 1962 โดย Yuri Denisyuk ในสหภาพโซเวียต และโดย Emmett Leith และ Juris Upatnieks ที่ University of Michigan ประเทศ USA ความก้าวหน้าในเทคนิคการประมวลผลโฟโตเคมีคัลเป็นการผลิต เพื่อแสดงภาพโฮโลแกรมที่มีคุณภาพสูง ซึ่งทำได้สำเร็จโดย Nicholas J. Phillips

โฮโลแกรมแบ่งได้เป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 2 ประเภท คือ white-light hologram ซึ่งภาพโฮโลแกรมที่บันทึกนั้น สามารถมองเห็นได้ด้วยการส่องสว่าง ด้วยแสงสว่างจากธรรมชาติ และอีกประเภทหนึ่งคือ ภาพโฮโลแกรม ที่ต้องถูกส่องสว่างด้วยแสงเลเซอร์ หรือแสงที่มีสภาวะหน้าคลื่นสอดคล้องกันในระดับหนึ่ง ถึงจะมองเห็นภาพ 3 มิติได้

นอกจากนี้ยังอาจแบ่งโฮโลแกรมออกได้เป็น transmission hologram, reflection hologram, image-plane hologram, และอื่น ๆ อีกหลายประเภท

ที่โฮโลแกรมหลายชนิดนั้นสามารถทำได้ การส่งผ่านของโฮโลแกรมเช่นการผลิตโดย Leith และ Upatnieks ซึ่งถูกทำให้มองเห็นได้โดยส่องแสงเลเซอร์ผ่านวัตถุ และมองภาพที่ถูกสร้างขึ้นใหม่จากโฮโลแกรมด้านตรงข้ามของแหล่งที่มา การปรับแต่งภายหลังการ หรือ "การส่งผ่านแถบสี" โฮโลแกรม ช่วยให้แสงสว่างโดยแสงสีขาวมากกว่าโดยเลเซอร์ แถบสีโฮโลแกรมเห็นได้ทั่วไปในปัจจุบันบนบัตรเครดิต ซึ่งเป็นคุณลักษณะด้านความปลอดภัยและในการบรรจุสินค้า รุ่นนี้ของการส่งผ่านแถบสีโฮโลแกรมเกิดขึ้นโดยทั่วไป เป็นรูปแบบผิวในฟิล์มพลาสติกและวัตถุรวมเคลือบอะลูมิเนียมสะท้อนแสงที่ให้แสงสว่างจาก "ด้านหลัง" เพื่อสร้างภาพของวัตถุ

### 2.5.2 วิธีการทำงานของโฮโลแกรม

โฮโลกราฟีเป็นเทคนิคที่ช่วยให้สนามของแสงซึ่งโดยทั่วไปผลิตผลของแหล่งกำเนิดแสงที่กระเจิงออกจากวัตถุที่จะได้รับการบันทึกและสร้างขึ้นใหม่ในภายหลังเมื่อสนามของแสงที่เป็นต้นฉบับดั้งเดิมเป็นปัจจุบันนั้นไม่มีอีกต่อไปเนื่องจากขาดหายไปของวัตถุที่เป็นต้นฉบับดั้งเดิม

หลักการของโฮโลแกรม เป็นภาพที่มีลักษณะ 3 มิติ ซึ่งแตกต่างจากภาพ 2 มิติ เช่น ภาพถ่าย ภาพวาด จอคอมพิวเตอร์ โทรทัศน์ เป็นต้น ภาพเหล่านี้จะเป็นภาพ 2 มิติ เมื่อแสงจากแหล่งกำเนิด แสง ไปกระทบผิวของภาพถ่าย, ภาพวาด ก็จะสะท้อนกลับมายังที่ตา ทำให้มองเห็นภาพเป็น 2 มิติ

แต่ภาพโฮโลแกรมจะใช้หลักการสร้างภาพให้มีการแทรกสอดของแสงที่มากระทบรูปภาพ โดยการฉายแสงเลเซอร์จากแหล่งเดียวกัน แยกเป็น 2 ลำแสง ลำแสงหนึ่งเป็นลำแสงอ้างอิงเล็งตรงไปที่แผ่นฟิล์ม อีกลำแสงหนึ่งเล็งไปที่วัตถุและสะท้อนไปยังฟิล์ม แสงจากทั้งสองแหล่งจะถูกบันทึกไว้บนฟิล์มในรูปแบบของการแทรกสอด (Interference Pattern) ซึ่งมองไม่คล้ายกับรูปของวัตถุต้นแบบ ก่อให้เกิดภาพเสมือน (Virtual image) ขึ้นมาตามมุมของแสงที่มาตกกระทบ ทำให้ตาของเรารับแสง อีกด้านหนึ่งของแผ่น Hologram เกิดเห็นภาพ 3 มิติขึ้น

การสร้างโฮโลแกรมแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

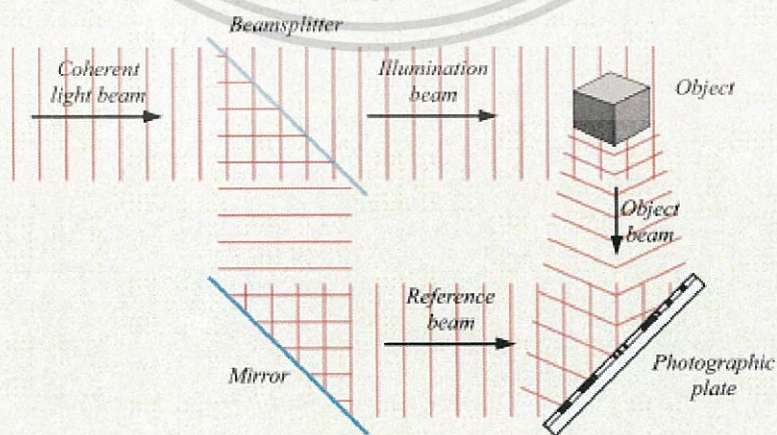
(1) การบันทึกภาพ (recording of image) เป็นการบันทึกแถบการสอดแทรกเชิงซ้อน (Complex interference patterns) ซึ่งเกิดจากที่แต่ละแสงเลเซอร์ 2 ลำแสงซ้อนทับกันอยู่ (Superposition) แถบการสอดแทรกเชิงซ้อนนี้จะถูกบันทึกไว้บนฟิล์มถ่ายรูป (Photographic film) ดังรูปที่ 2

สำหรับการบันทึกภาพในโฮโลแกรมนั้นจะมีการบันทึกอยู่ 2 แบบ คือ แอมพลิจูด (amplitude) และ เฟส (phase)

ซึ่งการบันทึกแบบแอมพลิจูดนั้น ก็มีหลักการเดียวกันกับรูปถ่ายทั่วไป ซึ่งจะสามารถบันทึกได้แต่ความเข้มแสง (intensity) และ ความยาวคลื่นของแสง (wavelength)

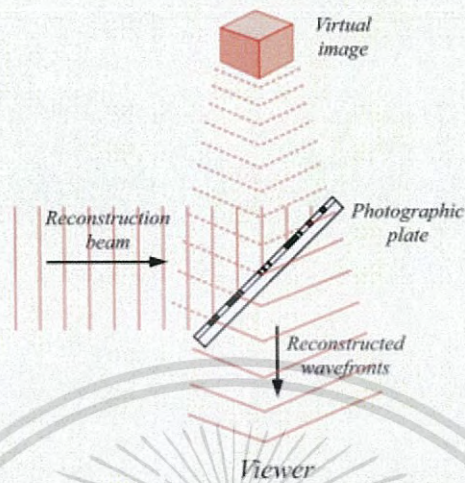
แต่ส่วนของการบันทึกด้วยเฟสนั้น จะสามารถบันทึกได้ทั้งหมด และ ยังสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของเฟส หรือ หน้าที่คลื่นที่เปลี่ยนไปได้ จึงทำให้สามารถนำไปศึกษาการเกิดการเคลื่อนที่ของเฟส (phase shifting) หรือกระทั่งพลวัตของเฟส (dynamic phase)

(2) การสร้างภาพ (reconstruction of image) เป็นการสร้างภาพ 3 มิติ ขึ้นจากแผ่น ดังรูปที่ 2.8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.8 แสดงการบันทึกภาพในโฮโลแกรม

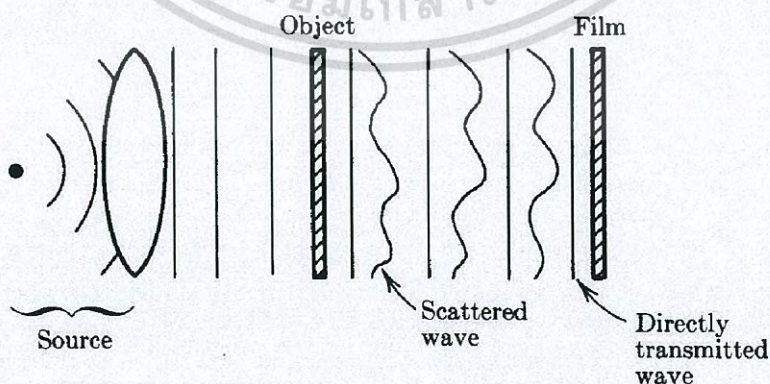


รูปที่ 2.9 แสดงการสร้างภาพในโฮโลแกรม

### 2.5.3 ระบบการจัดการบันทึกภาพของโฮโลแกรม

ระบบการบันทึกภาพของโฮโลแกรมนั้นมีอยู่ 2 แบบหลักๆ คือ ระบบแบบอินไลน์ (in-line) และระบบแบบอินเตอร์เฟอโรเมทรี (interferometry)

ระบบการจัดแบบอินไลน์ นั้นจะใช้แสงลำเดียวเป็นทั้งแสงอ้างอิง (reference beam) และแสงวัตถุ (object beam) ในลำเดียวกัน ซึ่งจะแสดงรูปดังรูปที่ 2. ซึ่งระบบนี้นั้นจะจัดระบบได้ง่ายกว่าระบบแบบอินเตอร์เฟอโรเมทรี จึงทำให้ระบบนี้มีความอ่อนไหว (sensitive) น้อย ถ้าให้กับวัตถุที่มีความอ่อนไหวง่ายหรือต้องการจับสั่นการแทรกสอดของริ้วแสงนั้นจะทำได้ยากกว่าระบบแบบอินเตอร์เฟอโรเมทรี

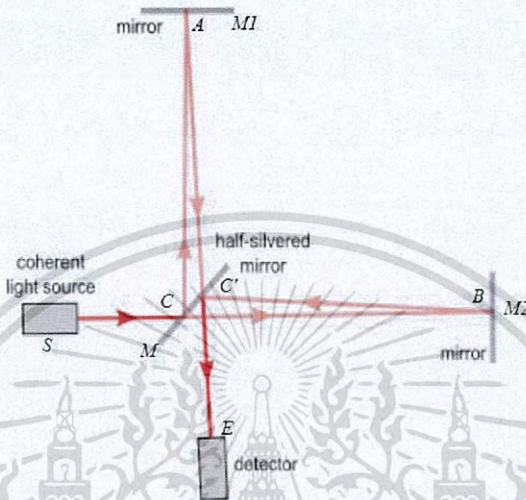


รูปที่ 2.10 แสดงการจัดแบบ in-line

ที่มา : <http://laser.physics.sunysb.edu/~dbennett/optics2/optics2.htm>

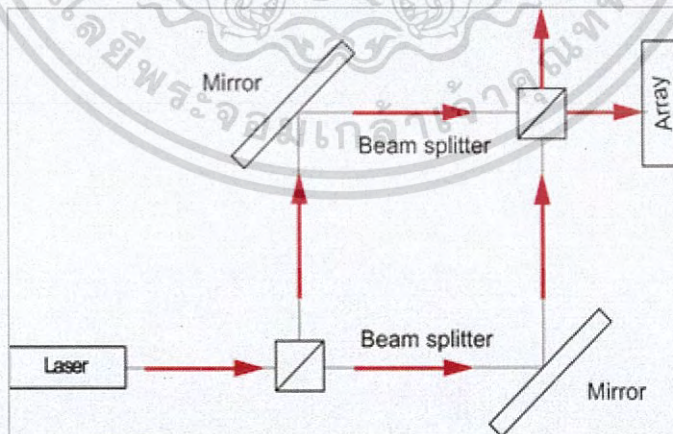
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบการจัดแบบอินเตอร์เฟอโรเมทรี นั้นจะใช้แสง 2 ลำในการไปแทรกสอดการบนฟิล์มหรือ กล้อง CCD ซึ่งการจัดจะยากกว่าแบบอินไลน์ สำหรับในระบบแบบอินเตอร์เฟอโรเมทรีนั้น การจัดก็มีอยู่หลายแบบ เช่น แบบไมเคลสัน (Michelson), แบบเมช เซห์นเดอร์ (mach zehnder) และอื่นๆ ซึ่งจะทำให้สังเกตการณ์สั้นหรือเคลื่อนไหวของริ้วการแทรกสอดได้ชัดเจนขึ้น



รูปที่ 2.11 แสดงการจัดระบบแบบ michelson

ที่มา : <https://www.boundless.com/physics/textbooks/boundless-physics-textbook/wave-optics-26/applications-of-wave-optics-177/the-michelson-interferometer-648-11273/>



รูปที่ 2.12 แสดงการจัดระบบแบบ mach zehnder

ที่มา : <https://www.quora.com/What-is-a-physical-example-of-a-unitary-operator-in-quantum-mechanics>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งในการทำการทดลองจะนำการจัดระบบทั้ง 2 แบบมาทดลองเพื่อนำมาเปรียบเทียบและสังเกต ความแตกต่างของทั้ง 2 ระบบนี้ว่าเป็นอย่างไร แต่ในระบบของอินเทอร์เฟอโรเมทรีนั้นจะใช้ ระบบแบบไมเคลสัน ในการทดลอง เพราะในแบบไมเคลสันนั้นจะมีลำแสง 2 ลำแยกกัน เมื่อยังไม่วางวัตถุ นั้น ถ้าระยะของลำแสงทั้ง 2 ข้างไม่เท่ากัน รั้วการแทรกสอดนั้นจะไม่สมบูรณ์ จึงทำให้สังเกตการ เปลี่ยนของรั้วได้ง่ายมากกว่าของแบบเมซ เซห์นเดอร์ และความเข้มแสงก็จะเข้มมากกว่าด้วย

## 2.6 ไดนามิก โฮโลกราฟี อินเทอเฟียร์โรมิเตอร์: อุปกรณ์และการประยุกต์ใช้

พื้นฐานของ Holography Interferometer และสิ่งที่น่าสนใจมากที่สุดในการริเริ่มการทดลอง ครั้งแรกซึ่งจะแสดงความสามารถที่ซ่อนอยู่ในผลึกโฟโตรีแฟรคทีฟที่มีอยู่มากในรูปแบบสื่อที่ หลากหลาย สำหรับการทดลองนี้ จะกล่าวถึงสิ่งที่เป็นเนื้อหาหลักๆสำหรับการพัฒนาของ Holography Interferometer และจะมีการวิเคราะห์ถึงความแตกต่างทางคุณสมบัติและรูปร่างของ ผลึกโฟโตรีแฟรคทีฟสำหรับเรื่องที่จะศึกษานี้ เราให้ความสำคัญกับเครื่องมือทางวิธีการของ เฟส คอนดิชันเนอร์ เพราะว่ามันจะทำให้สามารถแยกยอดออกไปในการทำเป็นระบบซึ่งตรงวัด ในหัวข้อ ถัดไปจะกล่าวถึง การนำเสนออุปกรณ์ซึ่งตรงวัดที่อยู่บนพื้นฐานของ Dynamic Holography Interferometer กับผลึกเซเลไนต์ ระบบแรกคือกล้องโฮโลกราฟีกับเลเซอร์แบบต่อเนื่องที่ถูกปรับให้ ใช้ในการศึกษาได้การเปลี่ยนไปของแสงที่กระเจิงจากวัตถุในบทหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงขั้นตอนในการ พัฒนาหลักๆ ซึ่งจะแสดงว่าการทดลองเรื่องนี้จะสร้างประโยชน์ได้มากและสามารถถูกนำไปใช้ในการ สังเกตปรากฏการณ์ที่มีความแตกต่างกัน ในระยะที่สองจะใช้อุปกรณ์มาศึกษาวัตถุที่มีความโปร่งใส อย่างแรกคือ มุ่งใช้ไปในการศึกษาสำหรับการทดลองของเหลวในสถานะไร้น้ำหนักและ อย่างที่สองคือ การนำมันไปใช้ในระบบแรกสำหรับการกระเจิงแสงของวัตถุปกติไปจนถึงวัตถุที่โปร่งแสงและ ระบบที่ สามคือการใช้พัลส์เลเซอร์เพื่อประยุกต์ใช้ในการเน้นการศึกษาการสั่นของโครงสร้าง

### 2.6.1 ประวัติ

ในการที่จะทำความเข้าใจอย่างถูกต้องถึงความแตกต่างในการทำงาน และความคล้ายคลึงกัน ของ Holography Interferometer (HI) กับ Photorefractive Crystals (PRCs) ที่ถูกขนออกมา หลากหลายกลุ่ม เราจะเริ่มที่บทนี้โดยการเล่าย้อนกลับไปเล็กน้อยถึงวิธีการทาง Holography Interferometer เป็นรูปแบบวิธีที่ทำภายใต้แสงโคฮีเรนต์ นั่นคือจะยอมให้มีการเกิดการแทรกสอดของ คลื่นสองขบวนหรือมากกว่าที่จุดหนึ่ง อย่างน้อยที่สุดสิ่งที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดโฮโลกราฟีในปริมาณ มากลวดลายการแทรกสอดจะถูกเรียกว่า Interferogram แสดงถึง Optical Path Different (OPD) ระหว่างหน้าคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก (ลวดลายริ้วแสง) กรณีที่เกิดบ่อยสุดคือ OPD มาจาก วัตถุที่คล้ายกันที่มีจังหวะไม่พร้อมกันในกรณีเกิดการเปลี่ยนแปลงของการกระจายแสงของวัตถุที่ไม่ ค่อยชดนั้นมันเกิดมาจากการเสียรูปของผิวหน้าหรือวัตถุเลื่อนออกจากตำแหน่งที่ติดตั้งไว้ขณะที่ใน กรณีของวัตถุที่โปร่งแสงมันจะเกิดจากความหนาหรือดัชนีหักเหของวัตถุมีวิธีทาง Holography Interferometer หลัก 3 วิธี Holography Interferometer แบบเรียลไทม์เป็นเพียงหนึ่งในวิธีบันทึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางโฮโลแกรมที่ขั้นตอนการเรียกข้อมูลจากเครื่องคอมพิวเตอร์ วัตถุจะยังคงทำให้ถูกเปล่งแสงและหนึ่งในการสังเกตผลของ Interferogram จากการซ้อนกันของหน้าคลื่นที่กระจายโดย โฮโลแกรมและอีกหนึ่งลำที่มาจากวัตถุโดยตรง(ถ่ายทอดผ่านโฮโลแกรม) วัตถุแต่ละอย่างจะถูกเฝ้าสังเกตโดยตรง (ริ้วแสงที่เกิดขึ้น ณ ตอนนั้น) การเกิดคู่สัมผัส Holography Interferometer (2E-HI) ต้องการการบันทึกโฮโลแกรมสองอันของวัตถุที่มีสภาพแตกต่างกัน ขั้นตอนการเรียกข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ที่เข้ามา (โดยปราศจากลำแสงจากวัตถุ) สำหรับวิธีทั้งสองนี้ อินเทอเฟียโรแกรมจะถูกเขียนเป็นสมการในรูปจุดของการสังเกตระนาบจากสมการ

$$I(x,y) = I_{\text{average}}(x,y), [1 + m(x,y)] \cos(\phi(x,y)) \quad (2.53)$$

โดยที่  $I_{\text{average}}(x,y)$  คือ ความเข้มแสงเฉลี่ย

$m(x,y)$  คือ ค่าความแตกต่าง

$\phi(x,y)$  คือ ปริมาณของความต่างเฟสระหว่างหน้าคลื่นส่องผ่านกับหน้าคลื่นหักเห

ค่าที่คำนวณได้ออกมาจะอยู่ในรูปของ OPDs

## 2.7 Photorefractive Holographic Interferometer

Photorefractive Holographic Interferometer เป็นการประยุกต์ใช้ผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟให้เป็นตัวบันทึกผลทางโฮโลแกรมเพราะว่าในการบันทึกโฮโลแกรมโดยปกติทั่วไปนั้นจะใช้แผ่นฟิล์มเป็นตัวบันทึกภาพข้อเสียอย่างหนึ่งที่เกิดคือภาพของโฮโลแกรมนั้นอาจจะสามารถบันทึกได้หรือไม่ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างอาทิเช่น การล้างแผ่นฟิล์ม และเมื่อทำการบันทึกแล้วข้อมูลแสงของโฮโลแกรมในแผ่นฟิล์มจะมีอายุสั้น การใช้ผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟมาเป็นตัวบันทึกข้อมูลทางโฮโลแกรมนั้นจะตัดปัญหานี้ออกไป อย่างแรกคือ ผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟจะสามารถบันทึกข้อมูลแสงไว้ได้โดยการถูกกระตุ้นจากแสงที่ส่องเข้ามาในผลึกนั้นคือการกระตุ้นอนุภาคอิเล็กตรอนในผลึกให้เกิดการเรียงตัวตามริ้วของแสงที่ส่องเข้ามา กล่าวคืออนุภาคอิเล็กตรอนในผลึกจะเรียงตัวตามริ้วของข้อมูลแสงที่ส่องเข้ามา หรือก็คือภาพของวัตถุที่ต้องการบันทึกนั่นเอง ข้อดีของการใช้ผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟเป็นตัวบันทึกข้อมูลคือสามารถใช้บันทึกภาพโฮโลแกรมได้ทันทีโดยไม่ต้องมีขั้นตอนอื่นๆเพิ่มเข้ามา และยังสามารถที่จะใช้ดูริ้วการแทรกสอดที่เปลี่ยนแปลงไปได้ตลอดเวลาที่สังเกตหรือที่เรียกกันว่า Real-time Photorefractive Holographic Interferometer

### 2.7.1 โครงสร้างผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟ

การรวมแสงจะเกิดกับผลึกที่ตลอดรอยตัด  $\langle 001 \rangle$   $\langle 110 \rangle$  และ  $\langle -110 \rangle$  และด้วยเวกเตอร์คลื่นเกรตติงที่ขนานกันที่  $\langle 001 \rangle$  มันสามารถถูกอธิบายได้โดยการบันทึกส่วนของข้อมูลของแสงที่มีปฏิริยาต่อกันด้วยเกรตติงพวกมันจะถูกบันทึกได้ในเนื้อสารที่เป็นผลึกนี้เป็นการปรับแต่งแอมพลิจูดและเฟสของแสงภายในผลึกมันจะแสดงถึงพลังงานทั้งหมดของความสามารถในการเปลี่ยนจากแสงที่เข้ามาไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นแสงที่กระเจิงออกไป (ในความควบคุมของแสงที่มาจากวัตถุ) การทำให้แสงจากวัตถุเข้มข้นระดับที่เพิ่มขึ้นของความเป็นโพโตรีแฟรกทีฟ  $\gamma$  คืออัตราส่วนระหว่างความเข้มแสงจากวัตถุที่ออกมาจากผลึกและที่เข้าไปในผลึกซึ่งหาได้จากสมการ

$$\gamma = \exp[(-\Gamma - \alpha/\cos \theta d)] \quad (2.54)$$

$\Gamma$  คือ ค่าคงที่การรวมแสง

ส่วนที่เหลือคือค่าพารามิเตอร์ของวัสดุบนค่าของสนามภายนอกและบนการกำหนดทิศทางของโพลาริซที่ท่ามกลางตัวแปรตัวอื่นสมบัติของการรวมแสงจะถูกประยุกต์ใช้ในงานเช่น การขยายภาพและตัวกรองแบบใหม่มันสามารถใช้ได้กับแค่วิธี Holography Interferometer ด้วยลักษณะของการถูกทำให้กระเจิงและส่งผ่านซึ่งมันจะมีสถานะทางโพลาริซที่คล้ายกันมันยังคงน่าสนใจที่จะได้รู้ถึงการวิวัฒนาการของความแตกต่างของฟังก์ชันที่ได้คือ  $\Gamma d$  ถ้าตัวหลังมีค่าน้อยกว่าหนึ่งหน่วยมันก็จะกลายเป็นสมการของ Interferometer ( $m \approx \Gamma d$ ) และ  $m=1$  ก็จะได้ค่า  $\Gamma d$  อยู่ที่ประมาณ 1.4 สำหรับตัวอย่างผลึกเซเลไนต์มีค่าคงที่การรวมแสงอยู่ที่  $0.5\text{cm}^{-1}$  ในย่านสีเขียวและความหนาของผลึกมีค่าอยู่ที่ 2cm การกระเจิงของแอนไอโซโทรปิกหรือการเปลี่ยนแปลงทางโพลาริซ จะเกิดที่บริเวณรอยตัดของผลึกคล้ายกับที่เกิดในกรณีของการรวมแสงแต่สำหรับเวกเตอร์คลื่นเกรตติ้งที่ขนานกันจะเกิดที่  $\langle 110 \rangle$  หรือ  $\langle -110 \rangle$  มันสามารถที่จะถูกอธิบายได้โดยการบันทึกข้อมูลของเกรตติ้งสองเกรตติ้งที่เกิดในเวลาไล่เลี่ยกันในผลึกนั้นคือเฟสถูกเปลี่ยนไป  $\pi/2$  และหลังจากการกระเจิงส่วนประกอบทั้งสองของแสงที่ถูกทำให้กระเจิงจะกลับมารวมกันอีกครั้งด้วยการเปลี่ยนแปลงนี้เพราะฉะนั้นผลึกจึงประพฤติตัวเหมือนกับคลื่นครั้งระนาบบนลำแสงที่ถูกทำให้กระเจิงมันจะถูกหมุนด้วยแสงที่มาจากวัตถุแค่นี้ก็เพียงพอสำหรับการวิเคราะห์หลังจากที่ผลึกได้ทำให้เกิดการแทรกสอดกันระหว่างลำแสงทั้งสอง ยิ่งไปกว่านั้นในส่วนของความเข้มของแสงที่กระเจิงจะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแสงที่มาจากแหล่งกำเนิดการกำหนดมุมวิเคราะห์ที่ถูกต้องจะเป็นหนึ่งในหนทางที่จะทำให้ได้รับ Interferometer ด้วยความแตกต่างกันจำนวนหนึ่งถ้าไม่มีการรบกวนจากพื้นหลังที่ใช้ดูผลที่เกิดการเกิดการกระเจิงของแอนไอโซโทรปิกจะสามารถเกิดได้โดยไม่ต้องอาศัยสนามไฟฟ้าความสัมพันธ์ของผลึกเซเลไนต์คือการประยุกต์ใช้ในการกระเจิงของแอนไอโซโทรปิกซึ่งถูกตั้งขีดจำกัดไว้จากเปอร์เซ็นต์การเกิดปฏิกิริยาทางแสงในความแตกต่างกันของผลึกเช่นผลึกสารกึ่งตัวนำ AsGa และ CdTe มันไม่สามารถที่จะเพิ่มความหนาของผลึกอย่างเป็นระเบียบได้ซึ่งจะทำให้เกิดผลกระทบโดยรวมของประสิทธิภาพการหักเหยกตัวอย่างเช่นในผลึก BSO เปอร์เซ็นต์ของปฏิกิริยาทางแสงตามธรรมชาติจะมีค่าที่มากที่สุดเป็นค่าแรกๆของประสิทธิภาพสำหรับความหนานั้นจะอยู่ที่ระหว่าง 2.5-3.0 มิลลิเมตร

### 2.7.2 การบันทึกทางเรขาคณิต

ลักษณะที่น่าสนใจจะถูกแสดงให้เห็นโดย PRCs เนื่องมาจากความหนาเปรียบเทียบกับสื่อโฮโลกราฟีแบบอื่น ความแตกต่างก็คือ ลำแสงอ้างอิงนั้นเข้ามาที่ด้านข้างของผลึกข้างใดข้างหนึ่งส่วนแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวัตถุจะเข้ามาทางด้านหน้าของผลึกในทางเรขาคณิตแสงทั้งสองลำนี้ทำมุมกัน 90 องศาซึ่งถูกพิจารณาครั้งแรกโดย Tontchev et al ในกล้องจุลทรรศน์โฮโลกราฟิก และได้เปรียบเทียบสิ่งที่น่าสนใจว่าเป็นการแพร่กระจายร่วมทางเรขาคณิตแบบดั้งเดิมในที่ๆแสงทั้งสองลำพุ่งเข้ามาในผลึกจากหน้าที่คล้ายกันแน่นอนว่าการแพร่กระจายร่วมทางเรขาคณิตนี้เป็นพื้นฐานที่จะนำไปสู่การเกิดการสูญเสียสัญญาณเมื่อตรวจจับด้วยกล้อง CCD และเมื่อแสงที่เข้ามาถูกทำให้เสียไปโดยฝุ่นหรือรอยขีดข่วนบนหน้าของผลึกนี้จึงทำให้มันอาจจะไม่ได้ทำมุมกัน 90 องศาจริงๆ ในทางเรขาคณิตยิ่งไปกว่านั้นเลนส์ใกล้วัตถุที่มีระยะโฟกัสที่สั้นจะสามารถถูกนำไปวางไว้ใกล้กับผลึกได้โดยที่จะไม่ถูกรบกวนจากอย่างอื่น

## 2.8 Real-time Photorefractive Interferometer for Dynamic Phase Perturbation by Self-interference in LiNbO<sub>3</sub>

โดยทั่วไปการทำให้ผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟสามารถบันทึกภาพโฮโลแกรมได้นั้นจะเกิดจากการแทรกสอดกันของแสง 2 ลำภายในผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟโดยที่เมื่อผลึกถูกกระตุ้นโดยแสงที่แทรกสอดกันนั้นผลึกจะถูกกระตุ้นทำให้อนุภาคอิเล็กตรอนในผลึกเกิดการเรียงตัวตามริ้วของแสงที่แทรกสอดกันทำให้เกิดเกรตติงภายในผลึกแต่ว่าการแทรกสอดกันของแสง 2 ลำนี้ถ้าหากว่าเฟสของแสงทั้ง 2 ลำไม่ตรงกันก็จะทำให้เกิดเกรตติงได้ยากหรือไม่เกิดขึ้นเลย ในกรณีของ Self-Interference นั้นคือการให้แสงลำเดียวส่องเข้าไปในผลึกและเกิดการแทรกสอดกันเองในผลึกซึ่งเป็นสมบัติอย่างหนึ่งของผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟ

### 2.8.1 ความเป็นมา

ผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟสามารถประยุกต์ทำให้เป็น Real-Time Interferometer ได้เพราะความสามารถในการบันทึกไดนามิกเกรตติงของตัวเอง Photorefractive Interferometer โดยทั่วไปแล้วแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ คือ

1. ผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟถูกใช้เป็นกระจกเฟสคอนจูเกต ในเฟสคอนจูเกต อินเทอเฟียร์โรเมทรี
2. ผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟถูกใช้บันทึกโฮโลแกรมใน Holography Interferometer

Photorefractive Holography Interferometer สามารถจำแนกออกได้อีกเป็น 3 รูปแบบคือ

- ไทม์ เอเวอร์เรจ
- เรียลไทม์
- ดับเบิล เอกซ์โพซอล

เช่นนี้ Interferometer จึงสามารถใช้เพื่ออะไรที่ไม่สามารถทำให้สำเร็จได้ด้วยข้อตกลงของ Interferometer ข้อเสียอยู่ที่การจัดตั้งการทดลองนั้นทำได้ยากและผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟมีความสามารถในการตอบสนองต่อแสงที่ต่ำต่อจากนี้เราจะสาธิต Photorefractive Interferometer แบบใหม่ที่สามารถใช้ในการวัดความบิดเบี้ยวของ ไดนามิกเฟส ได้สิ่งที่มาให้การตรวจวัดแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียลไทม์ได้เปรียบกว่าคือมันจัดตั้งได้ง่าย, มีการตอบสนองต่อแสงสูง, ใช้ผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟที่มีราคาไม่แพง และมีความคมชัดจากการสั้นโดยสภาพแวดล้อม

## 2.8.2 ลักษณะของอินเทอเฟียร์โรเมทรี

ในที่นี้เราจะอธิบายถึงลักษณะที่เป็นไปได้ของอินเทอเฟียร์โรเมทรี

### A. Holographic Real-time Interferometer

ในการทดลองที่ผ่านมาเราจะเห็นได้ว่า ลวดลายแสงที่ได้เป็นรูปแบบการเชื่อมโยงแบบปกติของ Real-Time Interferometer หรืออาจจะเห็นความแตกต่างกันเพียงชั่วคราวทางกายภาพของ Interferometer เราเชื่อว่า โฮโลกราฟีที่บันทึกได้โดยผลึกใน Interferometer นี้คือ Garbor บนภาพโฮโลกราฟีแสงที่ถูกทำให้โฟกัสสามารถที่จะแยกออกเป็นส่วนๆได้ตามการจัดตั้งตามระนาบคลื่นที่ต่างกันตามสมการ (2.55)

$$v(t) = \sum_{i=1}^n \tilde{a}_i(t, k_i) \quad (2.55)$$

ที่  $\tilde{a}_i$  คือ แอมพลิจูด ที่ประกอบกันของระนาบคลื่นโฮโลกราฟีถูกทำให้เกิดมาจาก Self-Interferometer ของแสงตกกระทบและสามารถอธิบายได้จากสมการที่ (2.56)

$$h(t) \propto |v(t)|^2 \propto \sum_{i=1}^n |\tilde{a}_i(t, k_i)|^2 + \sum_i \tilde{a}_i(t, k_i) \sum_{j \neq i} \tilde{a}_j^*(t, k_j) \quad (2.56)$$

เทอมที่ 2 แสดงถึงโฮโลกราฟีที่ประกอบไปด้วย sub holography จำนวน n ตัวนั่นคือการทำให้เกิดขึ้นมาโดยตัวประกอบหนึ่งของ อินเทอเฟียร์โรเมทรี กับตัวอื่นๆ n-1 ตัว แต่ละตัวประกอบแสดงถึงแสงจากวัตถุของแต่ละ sub holography และแสงเรเฟอเรนซ์อื่นๆของ sub holography ตัวอื่นๆที่ระนาบขาออกแสงแต่ละตัวจะถูกทำให้เกิดโดยมันจะมีตัวประกอบการถ่ายทอดที่เหมือนกันและโดยการกระจายออกจากตัวประกอบอื่น n-1 ถ้าเราสมมติว่านั่นเป็น เกรตตั้งท้วๆไป ที่มีคุณสมบัติเท่าๆกันแล้วแสงขาออกสามารถอธิบายได้เป็น (2.57)

$$v_{out}(t') \propto \alpha \sum_{i=1}^n \tilde{a}_i(t, k_i) + \beta \sum_{i=1}^n \tilde{a}_i(t, k_i) \sum_{j \neq i} \tilde{a}_j(t', k_j) \tilde{a}_j^*(t, k_j) \quad (2.57)$$

ที่  $\alpha$  และ  $\beta$  คือฟังก์ชันสเกลความถ่ายทอดและผลจากการกระจายออกและ t และ t' บอกถึงเวลาที่ใช้นบันทึกและ เวลาที่กระจายออก เป้าหมายคือ โดนามิกเฟสที่บิดเบี้ยวดังนี้ เราจึงกำหนดให้ความบิดเบี้ยวบางส่วนคือ (2.58)

$$\Delta v(t') = \sum_{i=p}^q \tilde{a}_i(t, k_i) \equiv \sum_{i=p}^q \tilde{a}_i(t, k_i) \exp [i\phi_i(x, y, t')] \quad (2.58)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\phi_i(x, y, t')$  คือ เฟสที่บิดเบี้ยว ที่  $t'$  โดยขึ้นกับ  $t$  เพราะฉะนั้นแสงขาออกจะเป็น superposition ของความถ่ายทอดและความกระจาย(2.59)

$$v_{out}(t') \propto \alpha \sum_{i=1}^n \tilde{a}_i(t, k_i) \beta \sum_{i=1}^n \tilde{a}_i(t, k_i) \times \left\{ \sum_{j=p}^q |\tilde{a}_j(t, k_j)|^2 \exp(i\phi_j) + \sum_{j \neq p \rightarrow q} \alpha_j(t, k_j)^2 \right\} \quad (2.59)$$

เทอมที่ 2 และ 3 แสดงถึงการกระจายจากเฟสบิดเบี้ยวและ เฟสที่ไม่บิดเบี้ยวตามลำดับใน เฟสบิดเบี้ยวบางส่วนนั้นจะมีเพียงแค่ส่วนของการกระจายเล็กๆแอมพลิจูดของแสงที่กระจายจะไม่ลดลงอย่าง เป็นสำคัญและแอมพลิจูดเกือบจะมีค่าเท่าๆกันดังนั้นแสงที่กระจายเป็นแสงเรเฟอเรนซ์ที่ดี เมื่อพิจารณา กับแสงที่ถ่ายทอดอธิบายแสงที่กระจายได้จาก (2.60) และ (2.61)

$$v_{diff}(t') = \sum_{j=p}^q \beta_j \tilde{a}_j(t, k_j) \quad (2.60)$$

$$\beta'_i = \beta \left\{ \sum_{j=p}^q |\tilde{a}_j(k_j)|^2 \exp(i\phi_j) + \sum_{j \neq p \rightarrow q} |\tilde{a}_j(k_j)|^2 \right\}_{j \neq i} \quad (2.61)$$

เมื่อ  $\beta$  คือฟังก์ชันสเกลของ แสงกระจาย สิ่งนี้ออกมาอธิบายได้จาก (2.62)

$$v_{out}(t') = \sum_{i=1}^n \tilde{a}_i(t, k_i) \{ \alpha \exp[i\phi_i(x, y, t')] + \beta' \} \quad (2.62)$$

ผลของ (2.69) แสดงให้เห็นว่าภาพที่ได้เป็นภาพปกติของ Real-time holography interferometer ส่วนที่เพิ่มเข้ามาความเร็วที่ต่ำของผลที่เกิดจากแสงที่กระจายอย่างคงที่ในผลึกจึงบอกได้ว่าทำไม interferometer จึงสามารถแสดงออกในรูปแบบ Real-time interferometer ได้

#### B. ความแตกต่างของภาพเฟส

การมองเห็นของ Real-time Phase บิดเบี้ยวได้รับความสำเร็จจาก Zernike รูปแบบความแตกต่างของเฟส เฟสบิดเบี้ยวสามารถแสดงเป็น(2.63)

$$v(r) = \exp [i\phi(r)] \quad (2.63)$$

ที่  $\phi(r)$  คือเฟสของแสงตกกระทบถ้าความต่างเฟสน้อยแล้วเราจะประมาณได้ว่า(2.64)

$$v(r) = 1 + i\phi(r) \quad (2.64)$$

แสงตกกระทบถูกโฟกัสให้กระทบกับผลึกโครงสร้างของแสงในผลึกเป็นสัดส่วน ของสเปกตรัม พูรีเรีย คือ(2.65)

$$U(f_r) = \delta(f_r - 0) + iU_{pd}(f_r) \quad (2.65)$$

ที่  $U(f_r)$  และ  $U_{pd}$  คือโครงสร้างของแสงทั้งหมดและเฟสบิดเบี้ยวของแสงในย่านความถี่หลักสมการ (2.65) แสดงถึงเฟสที่ไม่บิดเบี้ยวที่จุดโฟกัสที่ล้อมรอบโดยเฟสที่บิดเบี้ยว โดยอากาศรอนที่ขยายตัวของผลึกที่เกิดจากการดูดกลืนแสงตกกระทบในทางอุดมคติถ้าเราสมมติว่าเฟสเกิดขึ้นซ้ำเป็นค่าคงที่  $\Omega$  สมการ (2.64) จะเขียนใหม่ได้เป็น (2.66)

$$v(r) = \exp(-i\Omega) + i\varphi(r) \quad (2.66)$$

ความเข้มแสงที่ระนาบขาออกคือ (2.67)

$$I(r) = |v(r)|^2 = 1 + 2 \sin(\Omega) \varphi(r) \quad (2.67)$$

ภายใต้เงื่อนไขของ  $\Omega = (2n + 1) \pi / 2$  ที่  $n=0,1,2,3,\dots$  และความเข้มจะเขียนใหม่เป็น (2.68) ที่ + และ - จะบอกถึงสถานะของ  $n$  ว่าเป็น odd และ even ตามลำดับสมการ (2.68)

$$I(r) = 1 \pm 2\varphi r \quad (2.68)$$

แสดงถึงเฟสบิดเบี้ยวที่เป็นไปได้ที่จะมองเห็น เมื่อปราศจาก กระบวนการทาง holography

## 2.9 ฮีเลียม-นีออนเลเซอร์(He-NeLaser)

เป็นเลเซอร์ก๊าซ ประกอบด้วยก๊าซฮีเลียม (He) และนีออน (Ne) ในอัตรา ส่วนประมาณ 10:1 แหล่งกำเนิดพลังงานที่กระตุ้นให้เกิดประชากรผกผัน (มักเรียกอีกชื่อว่า pumping source) ที่ใช้จะเป็น electrical discharge คือทำให้มีอิเล็กตรอนวิ่งผ่านและชนกับก๊าซที่บรรจุอยู่ในหลอดเลเซอร์ แสงเลเซอร์ที่ได้จะเป็นสีแดง ที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร (หรือ  $632.8 \times 10^{-9}$  เมตร) และมีกำลังประมาณ 0.5 – 50 มิลลิวัตต์ มีการใช้งาน ฮีเลียม-นีออน เลเซอร์ ในการสอบเทียบ การวัด การสร้างภาพโฮโลแกรม ในงานอุตสาหกรรมใช้เป็นมาตรฐานในการสอบเทียบการวัดเชิงมิติ

### 2.9.1 การเกิดแสงเลเซอร์

ในสภาวะสมดุลความร้อน เมื่อพิจารณาอะตอมหนึ่ง ๆ จะมีพลังงานอยู่ค่าหนึ่ง ซึ่งจะสามารถอยู่ในชั้นพลังงานใดชั้นพลังงานหนึ่งได้ แต่ในธรรมชาติ ธาตุและสารประกอบจะประกอบด้วยอะตอม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนมาก ดังนั้นในชั้นพลังงานของอะตอมสำหรับธาตุหรือสารประกอบจึงมีอะตอมหรือประชากรอะตอมกระจายอยู่ในจำนวนที่แตกต่างกัน ซึ่งโดยมากแล้ว ประชากรอะตอมในชั้นพลังงานต่ำจะมีมากกว่าประชากรอะตอมในชั้นพลังงานสูง การเปลี่ยนชั้นพลังงานของประชากรอะตอมสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีพลังงานจากภายนอกมากระตุ้น เช่น การกระตุ้นโดยโฟตอนแสง (อนุภาคของแสง) ที่มีพลังงานเท่ากับความแตกต่างของระดับพลังงานพอดี กล่าวคือ ถ้าต้องการกระตุ้นอะตอมที่เดิมอยู่ในสถานะพื้น ให้ไปอยู่ในสถานะกระตุ้นที่ 1 โฟตอนแสงที่ไปกระตุ้นต้องมีพลังงานเท่ากับขนาดของผลต่าง  $E_0 - E_1$

การเปลี่ยนชั้นพลังงานของอะตอมที่เกิดขึ้นโดยการดูดกลืนโฟตอนแสง เป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า การดูดกลืนแสง (light absorption) แต่อะตอมที่อยู่ในชั้นพลังงาน  $E_1$  จะไม่เสถียร เมื่อเวลาผ่านไปอย่างรวดเร็ว อะตอมนั้นจะกลับมาอยู่ในชั้นพลังงาน  $E_0$  เช่นเดิม โดยปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของโฟตอนแสง ที่มีพลังงานเท่ากับ  $E_1 - E_0$  ปรากฏการณ์ปลดปล่อยโฟตอนโดยธรรมชาตินี้เรียกว่า การปล่อยแสงแบบเกิดขึ้นเอง (spontaneous emission)

ในปี ค.ศ. 1917 ไอน์สไตน์ ได้เสนอว่า นอกเหนือจากปรากฏการณ์ปล่อยแสงแบบเกิดขึ้นเองแล้ว ยังสามารถทำให้เกิดการปล่อยแสงโดยการถูกกระตุ้น (spontaneous emission) ได้ด้วย ซึ่งการปล่อยแสงโดยการถูกกระตุ้นนี้ เป็นกลไกหลักในการกำเนิดแสงเลเซอร์ กล่าวคือ ในขณะที่อะตอมอยู่ในสถานะกระตุ้น เช่น อยู่ในชั้นพลังงาน  $E_1$  ถ้ามีโฟตอนแสงจากภายนอกที่มีพลังงานเท่ากับความแตกต่างของระดับพลังงาน  $E_1 - E_0$  เข้ามาชน จะทำให้อะตอมที่อยู่ในชั้นพลังงาน  $E_1$  นี้ ถูกกระตุ้นให้ลงมายังชั้นพลังงาน  $E_0$  โดยมีการคายพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับ  $E_1 - E_0$  เนื่องจากโฟตอนแสงที่มาชนไม่ถูกดูดกลืนโดยอะตอมที่ถูกชน ทำให้จำนวนโฟตอนเพิ่มขึ้นเป็นสองอนุภาค (โฟตอนที่มากกระตุ้น บวกกับโฟตอนที่ได้จากการเปลี่ยนสถานะของอะตอม)

โฟตอนทั้งสองนี้มีพลังงานเท่ากัน มีความถี่เดียวกัน มีเฟสตรงกัน มีโพลาไรเซชันเหมือนกัน และเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน ซึ่งถ้าพิจารณาในมุมมองของคลื่นแล้ว จะพบว่าเมื่อแสงสองขบวนมีความถี่ตรงกัน มีเฟสตรงกัน เคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน สามารถที่จะรวมกันในลักษณะที่เสริมกันได้ ทำให้ได้คลื่นรวมที่มีขนาดโตขึ้น เกิดเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า การขยายสัญญาณแสง (light amplification) ขึ้น ถ้าสามารถทำให้เกิดการขยายสัญญาณแสงในลักษณะนี้ก็กับอะตอมเป็นจำนวนมาก ๆ ได้ ก็จะทำให้ได้สัญญาณแสงที่มีความเข้มสูงออกมา

จากที่กล่าวมา พบว่าปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งในการที่จะทำให้เกิดการขยายแสงโดยการกระตุ้นได้มาก ๆ คือการทำให้มีประชากรอะตอมในสถานะกระตุ้นมาก ๆ ซึ่งในธรรมชาติเป็นไปไม่ได้ จึงต้องมีการหาวิธีการที่จะทำให้อะตอมในสถานะกระตุ้น  $E_1$  มากกว่าสถานะพื้น  $E_0$

ปรากฏการณ์ที่ทำให้จำนวนประชากรอะตอมในชั้นพลังงานสูงมีมากกว่าประชากรในชั้นพลังงานต่ำ เรียกว่าประชากรผกผัน (population inversion) ในทางปฏิบัติสามารถทำให้เกิดประชากรผกผันได้โดยการใช้พลังงานจากภายนอกปริมาณหนึ่งที่ยังพอจะทำให้ประชากรอะตอมมีสถานะเปลี่ยนไปจากสถานะพื้น  $E_0$  ไปยังสถานะกระตุ้น  $E_1$  และทำให้การกระตุ้นประชากรอะตอมใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

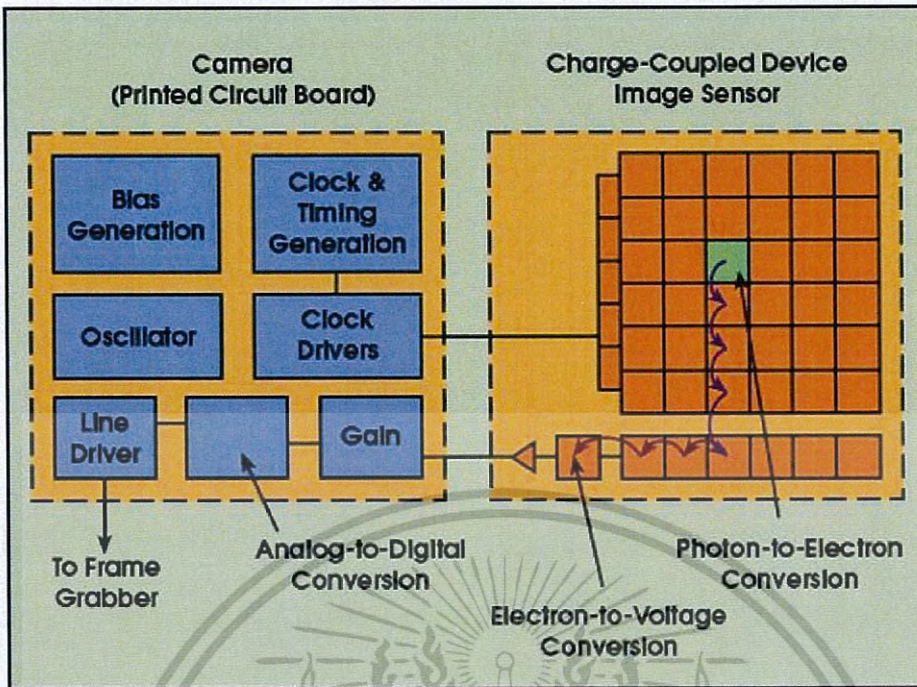
สถานะกระตุ้นให้ตกกลับมายังสถานะพื้น เพื่อให้ประชากรอะตอมปลดปล่อยโฟตอนแสงเป็นจำนวนมากออกมา

อย่างไรก็ตามการกระตุ้นประชากรอะตอมเพื่อให้มีการปล่อยแสงเพียงครั้งเดียวยังไม่สามารถทำได้แสงเลเซอร์ออกมา เนื่องจากในความเป็นจริง ในขณะที่เดียวกับที่เกิดการปล่อยแสงโดยการถูกกระตุ้น ก็จะมีการดูดกลืนแสงเกิดขึ้นด้วยโดยประชากรอะตอมในสถานะพื้น ทำให้ความเข้มแสงที่ได้มีปริมาณลดลง ดังนั้นเพื่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความเข้มของสัญญาณแสง จึงต้องทำให้เกิดปรากฏการณ์ปล่อยแสงโดยการถูกกระตุ้นอย่างต่อเนื่อง โดยการทำให้โฟตอนแสงที่ได้จากการปลดปล่อยของประชากรอะตอม มากระตุ้นให้เกิดการปลดปล่อยแบบถูกกระตุ้นซ้ำแล้วซ้ำอีก จนกระทั่งสัญญาณแสงมีความเข้มสูงขึ้นจนถึงจุดเลสซิง (lasing point) หรือจุดออสซิลเลตของเลเซอร์ (laser oscillating point) แสงที่ได้ออกมาจึงมีสมบัติเป็นแสงเลเซอร์

ด้วยสาเหตุที่แสงที่ได้นี้เกิดจากปรากฏการณ์ขยายสัญญาณโดยการปล่อยแสงแบบถูกกระตุ้น จึงเป็นที่มาของคำเต็ม laser ในภาษาอังกฤษที่มาจาก Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

## 2.10 กล้อง CCD

CCD ย่อมาจาก Charge Coupled Device เป็น Sensor ที่ทำงานโดยส่วนที่เป็น Sensor แต่ละพิกเซล จะทำหน้าที่รับแสงและเปลี่ยนค่าแสงเป็นสัญญาณอนาล็อก ส่งเข้าสู่วงจรเปลี่ยนค่าอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลอีกที ซึ่งการรับแสงเป็นไปได้อย่างเต็มที่ ไม่ต้องเสียพื้นที่ในการแปลงสัญญาณ



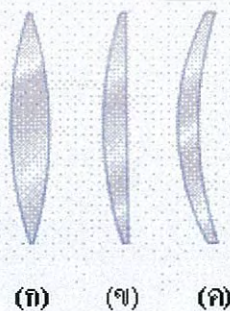
รูปที่ 2.13 แสดงการทำงานของกล้อง CCD  
ที่มา <http://www.klongdigital.com/data/ccd>

## 2.11 กระจกและเลนส์

### 2.11.1 เลนส์นูนหรือเลนส์รวมแสง (Convex or Converging Lenses)

คือ เลนส์ที่มีความหนา ตรงจุดศูนย์กลางมากกว่าที่ขอบและจะทำหน้าที่ รวมแสงขนานไปตัดร่วมกัน ที่จุดโฟกัสจริง(Real Focus) แบบต่าง ๆ ของเลนส์นูนมีดังนี้

- ก. เลนส์นูนสองด้าน (Double Convex Lens)
- ข. เลนส์นูนแกมระนาบ (Plano Convex Lens)
- ค. เลนส์นูนแกมเว้า (Concavo Convex Lens)



รูปที่ 2.14 แสดงเลนส์นูนแบบต่างๆ

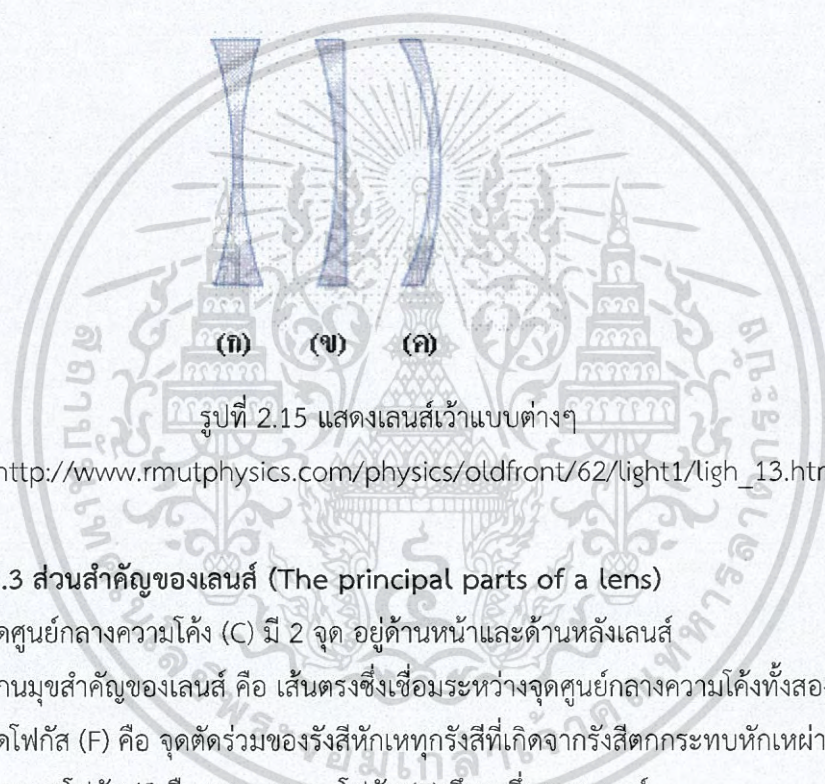
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มา [http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh\\_13.htm](http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh_13.htm)

### 2.11.2 เลนส์เว้าหรือเลนส์กระจายแสง (Concave or Diverging Lenses)

คือ เลนส์ที่มีความหนาตรงจุดกลางน้อยกว่าที่ขอบและจะทำหน้าที่กระจาย แสงขนานจากจุดโฟกัสเสมือน (Virtual Focus) แบบต่าง ๆ ของเลนส์เว้ามีดังนี้

- ก. เลนส์เว้าสองด้าน (Double Concave Lens)
- ข. เลนส์เว้าแฉกขนาน (Plano Concave Lens)
- ค. เลนส์เว้าแฉกนูน (Convexo Concave Lens)



ที่มา [http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh\\_13.htm](http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh_13.htm)

### 2.11.3 ส่วนสำคัญของเลนส์ (The principal parts of a lens)

- 1) จุดศูนย์กลางความโค้ง (C) มี 2 จุด อยู่ด้านหน้าและด้านหลังเลนส์
- 2) แกนमुखสำคัญของเลนส์ คือ เส้นตรงซึ่งเชื่อมระหว่างจุดศูนย์กลางความโค้งทั้งสอง
- 3) จุดโฟกัส (F) คือ จุดตัดร่วมของรังสีหักเหทุกรังสีที่เกิดจากรังสีตกกระทบหักเหผ่านเลนส์
- 4) ทางยาวโฟกัส (f) คือ ระยะจากจุดโฟกัส (F) ถึงจุดกึ่งกลางเลนส์
- 5) รัศมีความโค้ง (R) คือ ระยะจากจุดศูนย์กลางความโค้ง C ถึงผิวโค้งของเลนส์ โดย  $f = R/2$

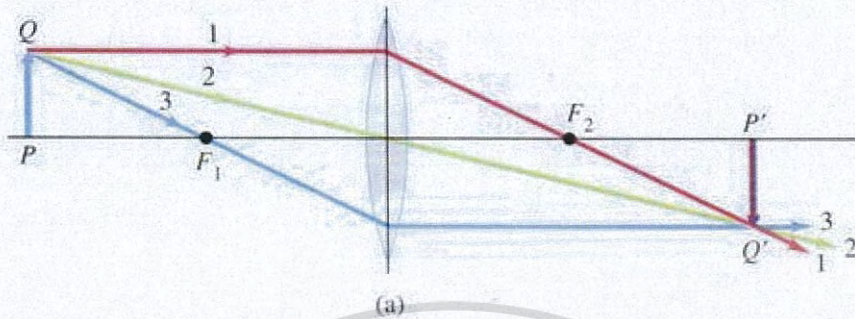
### 2.11.4 การหักเหของแสงผ่านเลนส์

การหาลักษณะของภาพและตำแหน่งของภาพที่เกิดจากการหักเหของแสงผ่านเลนส์ โดยการวาดรังสี ซึ่งมีขั้นตอนการเขียนรังสีของแสง ตกกระทบและรังสี หักเหของแสง ดังนี้

- ก. รังสีเส้นที่หนึ่ง ให้ลากรังสีของแสงจากวัตถุขนานกับแกนमुखสำคัญของเลนส์ไปตกกระทบเลนส์ ต่อมาลากรังสีหักเหของแสงจากเลนส์จะผ่านที่จุดโฟกัส ซึ่งอยู่ด้านหลังเลนส์
- ข. รังสีเส้นที่สอง ให้ลากรังสีของแสงจากวัตถุไปตกกระทบที่จุดกึ่งกลางเลนส์ต่อมาลากรังสีหักเหของแสงจากเลนส์ต่อจากจุดกึ่งกลางเลนส์ออกไป

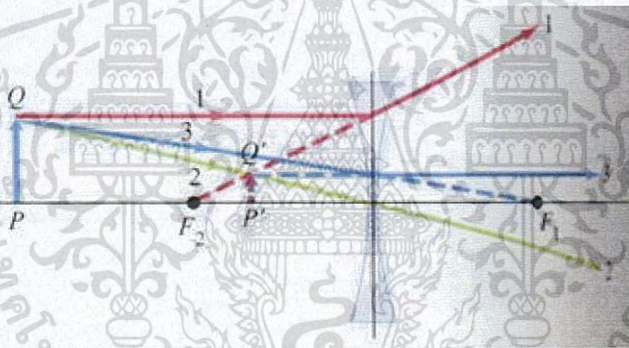
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. รังสีเส้นที่สาม ให้ลากรังสีของแสงจากวัตถุผ่านจุดโฟกัสไปตกกระทบเลนส์ต่อมาลากรังสีหักเหของแสงจากเลนส์ออกไปด้านหลังเลนส์ โดยขนาน กับแกนमुखสำคัญ รังสีทั้งสามจะไปตัดกันที่ด้านหลังของเลนส์ที่ตำแหน่งหนึ่งซึ่งตำแหน่งนั้นคือตำแหน่งของภาพ ที่เกิดขึ้น ดังรูป



รูปที่ 2.16 แสดงการหักเหของแสงเมื่อผ่านเลนส์นูน

ที่มา [http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh\\_13.htm](http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh_13.htm)



รูปที่ 2.17 แสดงการหักเหของแสงเมื่อผ่านเลนส์เว้า

ที่มา [http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh\\_13.htm](http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh_13.htm)

### 2.11.5 การหาตำแหน่งภาพ

สามารถหาตำแหน่งของภาพได้จากสมการ

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} \quad (2.69)$$

โดยที่  $f$  คือความยาวโฟกัส

$s$  คือระยะวัตถุ

$s'$  คือระยะภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.11.6 กำลังขยาย (Magnification)

กำลังขยายของภาพที่เกิดโดยกระจก แขนด้วย  $M$  สามารถคำนวณได้โดย กำลังขยายมีค่าเท่ากับ อัตราส่วนระหว่างระยะภาพ ( $s$ ) กับระยะวัตถุ ( $s'$ ) หรืออัตราส่วน ระหว่างขนาดภาพ ( $I$ ) และขนาดวัตถุ ( $O$ ) คือ

$$M = \frac{I}{O} = \frac{s}{s'} \quad (2.70)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงานและการทดลอง

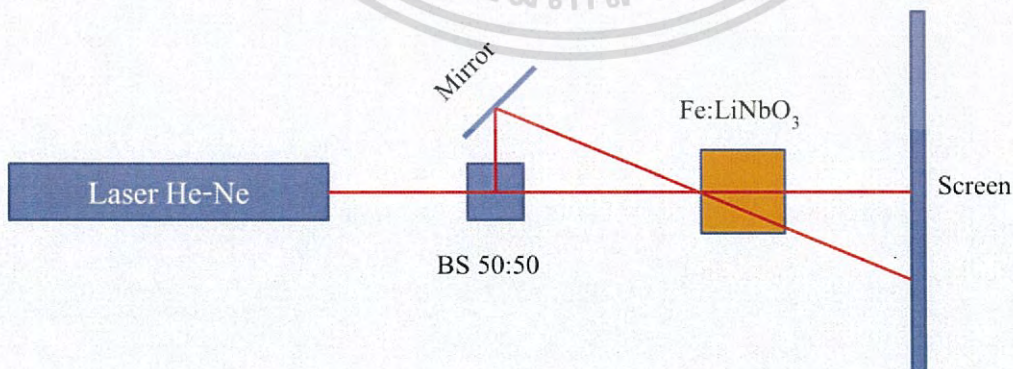
ตอนที่ 1 การทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรคทีฟ (Photorefractive Effect) และการถ่ายโอนพลังงานของแสง (Beam Transfer)

อุปกรณ์ในการทดลอง

1. Laser He-Ne 632.8 nm 12 มิลลิวัตต์
2. Beam Splitter อัตราส่วน 50:50
3. กระจกสะท้อน
4. ฐานวางผลึก
5. เครื่องวัดความค่าความเข้มแสง
6. ผลึก  $\text{Fe:LiNbO}_3$
7. ฉากรับแสง

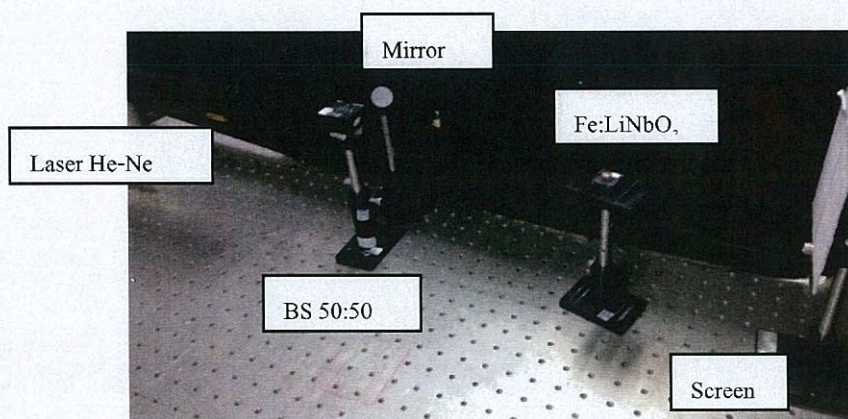
วิธีการทดลอง

1. จัดเลเซอร์ให้แนวของลำแสงที่ยังออกมาขนานกับระนาบของโต๊ะ
2. นำอุปกรณ์แยกแสง (beam splitter) มาวางไว้หน้าเลเซอร์เพื่อทำการแยกแสงเป็น 2 ลำ และจัดลำแสงให้ตรงกับแนวเดิม
3. นำผลึกบางวางไว้บนฐานวาง และนำฐานที่มีผลึกบางไปวางไว้ที่แสงผ่านมา
4. นำกระจกสะท้อนมาวางไว้ที่แสงที่ถูกแยกมาจากอุปกรณ์แยกแสงเพื่อจะสะท้อนแสงให้ไปตกกระทบกันบนผลึก
5. จัดลำแสงทั้ง 2 ลำ เพื่อให้เกิดการแทรกสอดการบนผลึกตั้งรูป



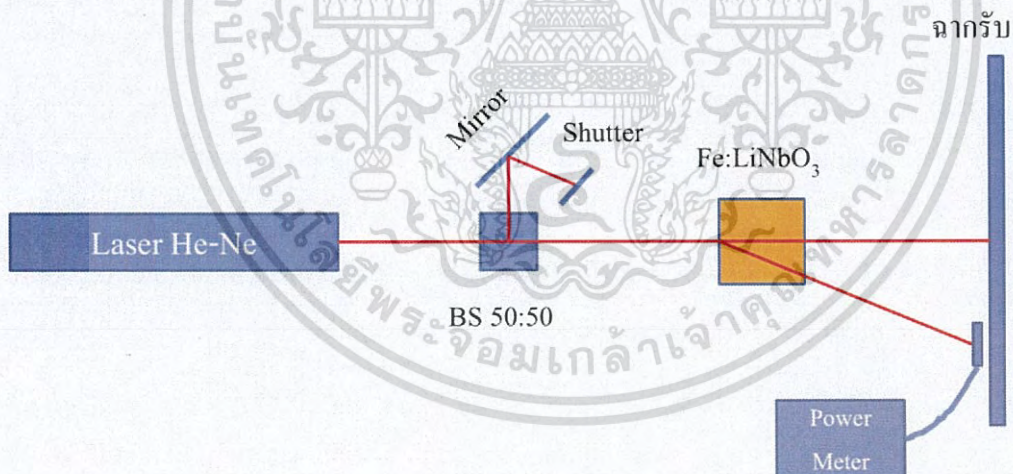
รูปที่ 3.1 รูปแสดงการทดลองปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรคทีฟ (photorefractive effect)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



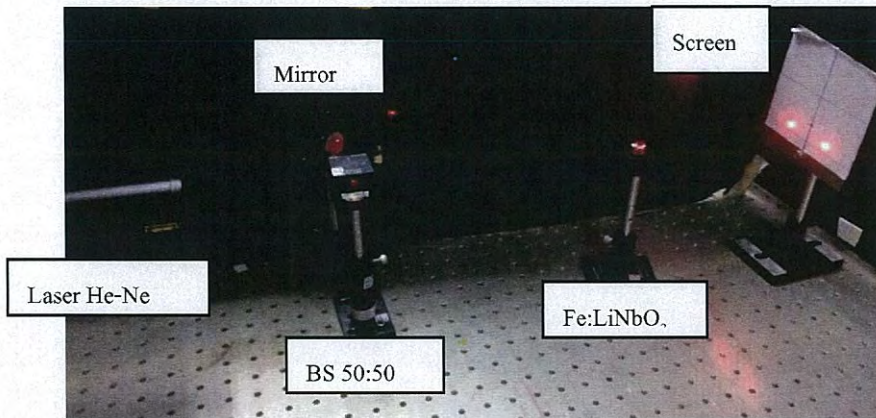
รูปที่ 3.2 แสดงการจัดอุปกรณ์จริงในการทดลองปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ (photorefractive effect)

6. จับเวลา 180 วินาทีเพื่อให้ผลึกบางเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ
7. เมื่อปิดแสงไม่ให้สะท้อนกระจก จะเกิดแสงถ่ายโอน (beam transfer) เกิดขึ้นแล้วนำ
8. เครื่องวัดความเข้มแสง มาวัดความเข้มแสงที่เป็น Beam Transfer
9. หมุนผลึกไปที่หน้าต่างๆ เพื่อวัดความเข้มแสงของแสงถ่ายโอนที่หน้าต่างๆของผลึก



รูปที่ 3.3 รูปแสดงการวัดการถ่ายโอนพลังงานของแสง (Beam Transfer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 รูปแสดงการทดลองเพื่อเตรียมวัดการถ่ายโอนพลังงานของแสง (Beam Transfer)

## ตอนที่ 2 การทดลองเพื่อศึกษา พลวัตโฮโลกราฟี (Dynamic holography)

แบ่งย่อยได้อีกเป็นการทดลองย่อยอีก 2 ตอนคือ

### ตอนที่ 2.1 การทดลองเพื่อศึกษา พลวัตโฮโลกราฟี (Dynamic holography) โดยการจัดการทดลองแบบไมเคิลสัน (Michelson)

#### อุปกรณ์การทดลอง

1. Laser He-Ne 632.8 นาโนเมตร 12 มิลลิวัตต์
2. Beam Splitter อัตราส่วน 50:50
3. กระจกสะท้อน 3 บาน
4. ฐานวางผลึก
5. ผลึก Fe:LiNbO<sub>3</sub>
6. กล้อง CCD
7. ตัวอักษร K ที่ติดบนแผ่นพลาสติก
8. เทียนไข
9. เลนส์
10. เครื่องวัดความเข้มแสง

#### วิธีการทดลอง

1. จัดเลเซอร์ให้แนวของลำแสงที่ยิงออกมาขนานกับระนาบของโต๊ะ
2. วางเลนส์ L1 เพื่อให้ลำแสงเลเซอร์ขยายออก
3. วางเลนส์ L2 ตัวที่สองที่จุดที่ลำแสงขยายออกจนมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 5 มิลลิเมตร เพื่อให้แสงเป็นลำขนาน
4. วางกระจก M1 ให้ลำแสงเข้าไปในอุปกรณ์แยกแสง (beam splitter)

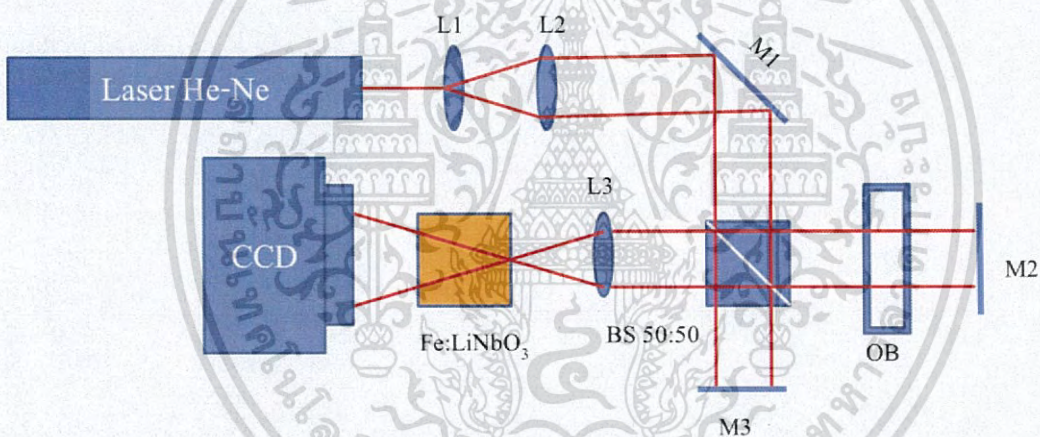
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ให้แสงลำที่ 1 วิ่งผ่านวัตถุ ซึ่งก็คือ ตัวอักษร K โดยให้ลำแสง ส่องผ่านบนตัวอักษร K ให้มากที่สุดแล้ววางกระจก M2 ให้แสงจากวัตถุสะท้อนกลับเข้าอุปกรณ์แยกแสง
6. แสงลำที่สอง ให้วางกระจก M3 สะท้อนลำแสงกลับเข้าอุปกรณ์แยกแสง เพื่อให้แสงอ้างอิงแทรกสอดกับแสงจากวัตถุ ภายในอุปกรณ์แยกแสง
7. นำเลนส์ L3 มาวางเพื่อขยายลำแสงให้ฉายไปบนฉากหลังหรือกล้อง CCD
8. ให้ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้งโดยแต่ละครั้งให้ทำตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้ตามลำดับ

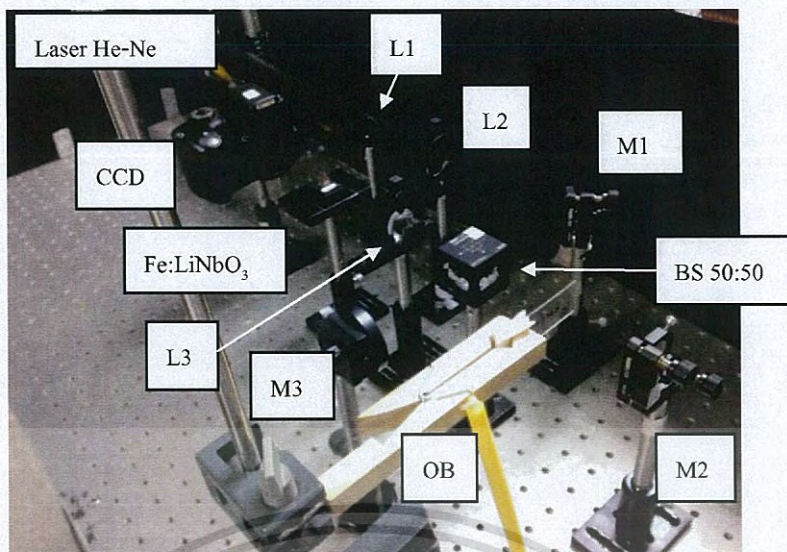
8.1 ลำแสงไม่ผ่านผลึก

8.2 ลำแสงผ่านผลึกให้วางผลึกระหว่าง Beam Splitter และ เลนส์นูน โดยเลือกหน้าผลึกที่เกิดปรากฏการณ์โพโตรีแฟรกทีฟ ได้นานที่สุดจากการทดลองตอนที่ แล้วโดยในแต่ละครั้งให้ทำการ วัดความเข้มแสงที่ผ่านออกมาด้วยเครื่องวัดความเข้มแสงก่อนเข้ากล้อง CCD ด้วยทุกครั้งแล้วบันทึกผลลงตาราง

9. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 5. แต่ให้เปลี่ยนวัตถุจาก ตัวอักษร K เป็น เทียนไขที่จุดไฟแล้ว



รูปที่ 3.5 รูปแสดงการทดลองพลวัตโฮโลกราฟี (Dynamic holography) โดยการจับแบบไมเคลสัน (Michelson)



รูปที่ 3.6 รูปแสดงการจัดอุปกรณ์จริงในการทดลองพลวัตโฮโลกราฟี (Dynamic holography) โดยการจัดแบบไมเคลสัน (Michelson)

## ตอนที่ 2.2 การทดลองเพื่อศึกษา พลวัตโฮโลกราฟี (Dynamic holography) โดยการจัดการทดลองแบบอินไลน์ (In-line)

### อุปกรณ์การทดลอง

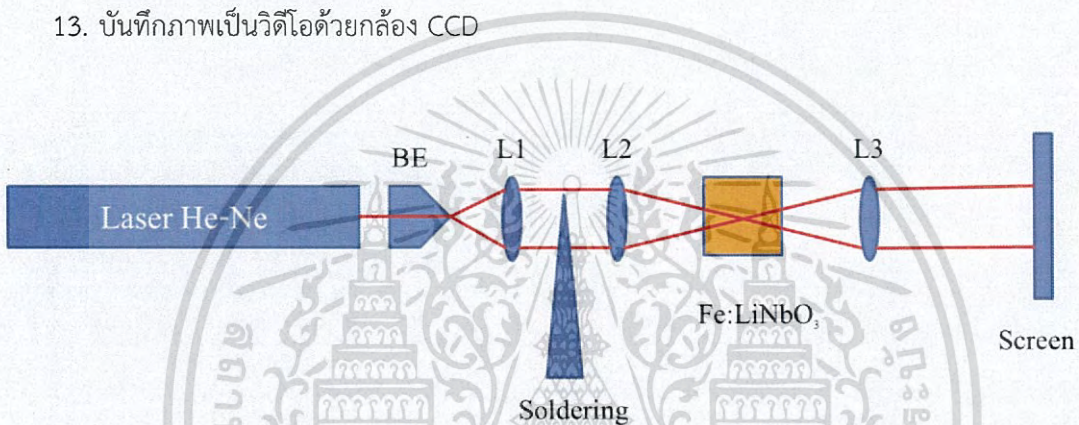
1. Laser He-Ne 632.8 นาโนเมตร 12 มิลลิวัตต์
2. ฐานวางผลึก
3. ผลึก Fe:LiNbO<sub>3</sub>
4. ฉากรับ
5. เลนส์
6. เครื่องวัดความเข้มแสง
7. Beam Expander
8. หัวแร้งบัดกรี
9. กล้อง CCD

### วิธีการทดลอง

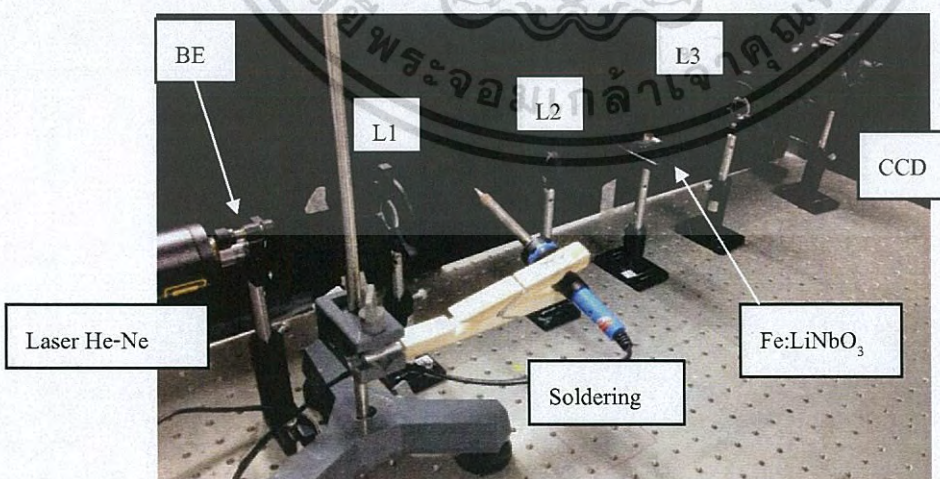
1. จัดวางเลเซอร์ให้ลำเลเซอร์มีทิศทางขนานกับโต๊ะในแนวระนาบและจัดให้ลำเลเซอร์ตรงโดยใช้ฉากรับดูว่าที่จุดใกล้สุดและจุดไกลสุดแสงเลเซอร์อยู่ ณ ตำแหน่งเดิมหรือไม่
2. นำ Beam Expander มาวางหน้าเลเซอร์เพื่อขยายลำแสงให้ลำแสงมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร
3. นำเลนส์ L1 มาวางเพื่อทำให้ลำแสงขนาน ณ จุดที่ลำแสงมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. นำหัวแร่บังคับกรีมาวางให้ลำแสงส่องทับบริเวณปลายหัวแร่
5. นำเลนส์ L2 มาวางเพื่อปับลำแสงเข้าผลึกลิเทียมไนโอเบต
6. ที่จุดโฟกัสของเลนส์ L2 ให้วางผลึกลิเทียมไนโอเบต
7. นำเลนส์ L3 มาวางเพื่อทำให้แสงเป็นลำขนานก่อนที่จะส่องลงบนฉากรับ
8. นำฉากรับมาวางเพื่อสังเกตผล
9. เปิดสวิตต์เลเซอร์
10. เสียบปลั๊กไฟหัวแร่เพื่อให้หัวแร่มีความร้อน
11. ทำการเป่าลมไปที่บริเวณหัวแร่ที่ร้อน
12. สังเกตภาพที่เกิดบนฉากรับ
13. บันทึกภาพเป็นวิดีโอด้วยกล้อง CCD



รูปที่ 3.7 รูปแสดงการทดลองพลวัตโฮโลกราฟี (Dynamic holography) โดยการจัดแบบอินไลน์ (In-line)



รูปที่ 3.8 รูปแสดงการจัดอุปกรณ์จริงเพื่อทดลองพลวัตโฮโลกราฟี (Dynamic holography) โดยการจัดแบบอินไลน์ (In-line)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

#### 4.1 ผลการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ โฟโตรีแฟรกทีฟ ในผลึก $\text{LiNbO}_3$

จากการศึกษาทดลองเพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้งานในผลึกลิเทียมไนโอเบตชนิดที่เจือด้วยอะตอมของเหล็กแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งผลึกลิเทียมไนโอเบตนี้มีลักษณะที่เป็นผลึกใสขนาด 7 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ในการทดลองนั้นได้แบ่งออกเป็นทั้งหมด 2 ตอน ตอนที่ 1 คือการทดลองปรากฏการณ์ โฟโตรีแฟรกทีฟ ของผลึกลิเทียมไนโอเบต และตอนที่ 2 คือการทดลองการประยุกต์ใช้งานของผลึกลิเทียมไนโอเบต ซึ่งมีชื่อว่า ไดนามิกโฮโลกราฟีอินเทอเฟียร์โรมิเตอร์ โดยในการทดลองทั้ง 2 ตอนนั้นจะใช้เลเซอร์ฮีเลียมนีออนขนาด 12 มิลลิวัตต์ที่มีความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร



รูปที่ 4.1 ผลึกลิเทียมไนโอเบตในขณะที่มีแสงเลเซอร์สองลำแทรกสอดกับบริเวณผิวหน้าผลึก

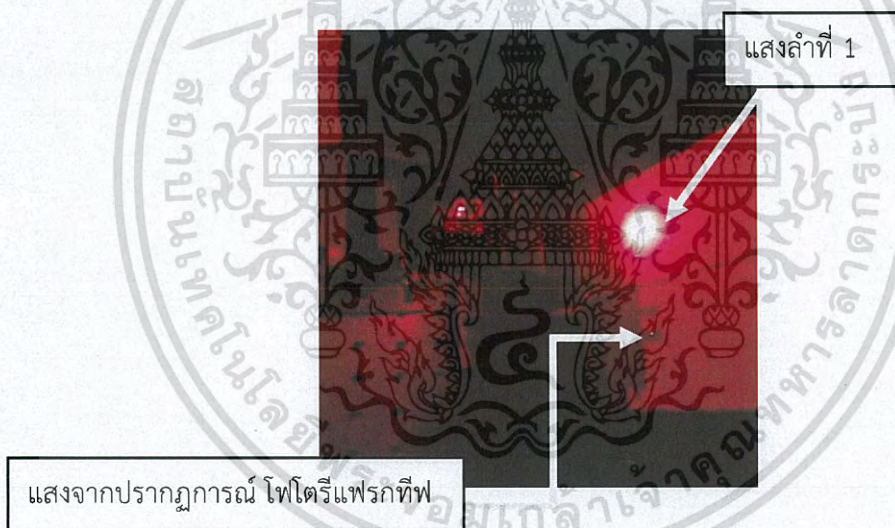
ผลการทดลองในตอนที่ 1 เมื่อทำให้ลำแสงเลเซอร์สองลำเกิดการแทรกสอดกันที่บริเวณผิวหน้าของผลึกลิเทียมไนโอเบตจะเป็นการกระตุ้นให้อะตอมภายในผลึกถูกกระตุ้นจากลำแสงและเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ ผลึกสามารถสร้างสนามที่ว่างประจุขึ้น แบบเป็นคาบตามแถบการแทรกสอดของแสง เป็นสาเหตุให้ค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลางมีความแตกต่างกัน จากนั้นผลึกสามารถสร้างดัชนีเกรตติงขึ้น เรียกว่าปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟทำให้ลำแสงสามารถเลี้ยวเบนผ่านเกรตติงออกจากแนวของลำแสงตกกระทบเกิดเป็นลำแสงเลี้ยวเบนซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิกดังที่แสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 แสดงการทดลองดูปรากฏการณ์โพโตรีแฟรกทีฟ

ในภาพประกอบไปด้วย ฐานวางผลึก, ปีมสปลิตเตอร์อัตราส่วน 50:50, กระจกสะท้อน, ฉากหลัง และ เลเซอร์ He-Ne

จากภาพที่ 4.2 จะเห็นได้ว่ามีลำแสงปรากฏบนฉากหลัง 2 จุด ให้จุดที่ใหญ่กว่าเป็นจุดจากลำแสงที่ 1 และจุดที่เล็กกว่าเป็นจุดจากลำแสงที่ 2



รูปที่ 4.3 การเกิดปรากฏการณ์โพโตรีแฟรกทีฟ

ซึ่งในการทดลองตอนที่ 1 นี้ได้ทำการทดลองกับหน้าผลึกทั้งหมด 4 หน้าเพื่อหาหน้าของผลึกที่เกิดปรากฏการณ์โพโตรีแฟรกทีฟได้ดีที่สุดเพื่อนำไปใช้กับการทดลองตอนที่ 2 ซึ่งวัดได้จากความเข้มของแสงที่เกิดจากปรากฏการณ์ โพโตรีแฟรกทีฟ โดยในการทดลองตอนที่ 1 จะให้แสงสอง ลำมาแทรกสอดกันบริเวณผิวหน้าของผลึกของหน้าที่ต้องการจะตรวจสอบเป็นเวลา 180 วินาทีจากนั้นจึงปิดลำแสงลำที่ 2 เพื่อดูการเกิดปรากฏการณ์โพโตรีแฟรกทีฟและทำการวัดความเข้มแสงที่เกิดจากปรากฏการณ์ โพโตรีแฟรกทีฟซึ่งผลที่ได้สามารถแสดงให้เห็นในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงความเข้มแสงที่เกิดจากปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟของผลึกลิเทียมไนโอ

เบต

หน้าผลึก	ความเข้มแสง(nW)			เฉลี่ย (nW)
1	4.09	3.96	4.19	4.08
2	3.91	4.50	4.25	4.22
3	19.30	10.51	7.04	12.28
4	22.80	10.82	5.99	13.20

ผลจากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าหน้าผลึกที่ 3 และ 4 จะมีการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟได้ดี ที่สุดเนื่องจากในการทดลองซ้ำๆกันนั้น หน้าผลึกที่ 3 และ 4 จะวัดความเข้มของลำแสงที่เกิดจากปรากฏการณ์ ได้เข้มกว่าอีก 2 หน้าที่เหลือเพราะว่าระนาบของผลึกมีค่าไม่เท่ากันซึ่งจะมีค่ามากที่สุดที่หน้า 3 และ 4 จึงทำให้ Beam Transfer หน้า 3 และ 4 มีความเข้มมากที่สุดจุดประสงค์คือตรวจสอบหาหน้าของผลึกที่สามารถเกิดปรากฏการณ์นี้ได้ดีที่สุ่สุดแล้วนำมาประยุกต์ใช้ในการในการทดลองตอนที่ 2

#### 4.2 ผลการประยุกต์ใช้ผลึก $\text{LiNbO}_3$ เป็นตัวบันทึกภาพโฮโลแกรม

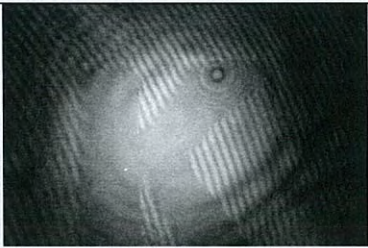
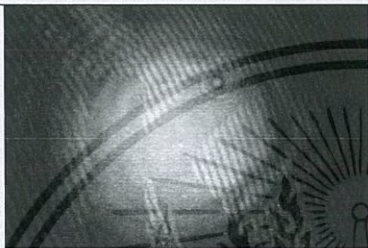



##### 4.2.1 การใช้ผลึก $\text{LiNbO}_3$ บันทึกโฮโลแกรมโดยใช้การจัดแบบ ไมเคิลสัน โดยมีวัตถุในภาพ 2 ชั้น คือ แผ่นกลาสไลต์ที่แปะตัวอักษร K และ เพลวเทียน

การประยุกต์นำผลึกลิเทียมไนโอเบตมาใช้บันทึกภาพโฮโลกราฟิก อินเทอเฟียร์โรแกรม เมื่อทำการจัดอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 3.1 จากในบทที่ 3 แล้วจึงจะทำการถ่ายภาพด้วยกล้อง CCD ในการทดลองตอนที่ 2 จะใช้วัตถุ 2 ชนิดคือ กลาสไลต์ที่แปะตัวอักษร K และเพลวเทียน ในที่นี้คือแสงจากวัตถุเมื่อแสงเลเซอร์ ผ่าน บีมสปีดเตอร์เข้าไปหาวัตถุ(ตัวอักษร K บนกลาสไลต์หรือเพลวเทียน) แล้วผ่านออกไปข้างหลัง เข้า กระจกที่วางไว้แล้วสะท้อนกลับมาแทรกสอดกับแสงเรเฟอเรนซ์ภายในบีมสปีดเตอร์แสงทั้งสองลำ จะถูกตรวจจับโดยกล้อง CCD และยังได้ทำการวัดความเข้มของแสงที่จะเข้ากล้องในแต่ละกรณีเพื่อนำมาเปรียบเทียบโดยในการทดลองนี้ได้แบ่งออกเป็น 2 กรณีของในแต่ละวัตถุตัวอย่างที่ใช้ทดลองคือ

- 1.ในกรณีที่ไม่ผ่านผลึก
- 2.ในกรณีที่ผ่านมาผลึก

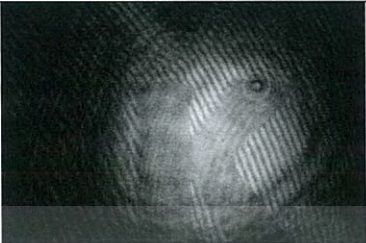
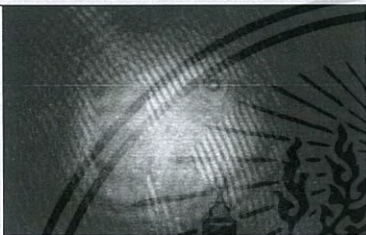


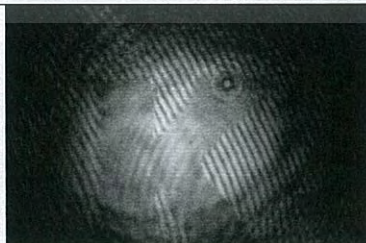
แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน ดังตารางที่ 4.2-4.5

ตารางที่ 4.2 ภาพตัวอักษร K และค่าความเข้มแสงที่วัดได้ในกรณีที่ไม่ผ่านผลึก

ไม่ผ่านผลึก LiNbO <sub>3</sub>	
ภาพที่	I (mW)
 1	2.75
 2	2.73
 3	2.75
 4	2.72
 5	2.71
เฉลี่ย	2.73

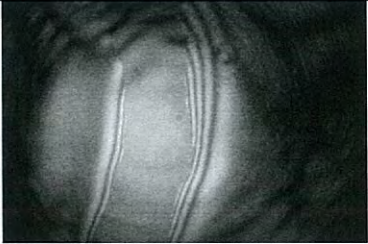
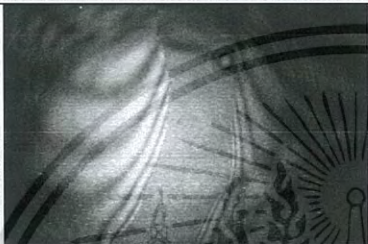


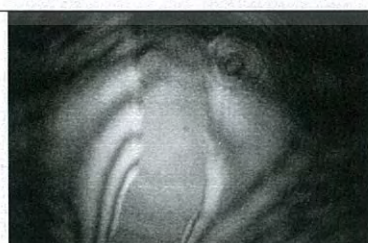
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ภาพตัวอักษร K และค่าความเข้มแสงที่วัดได้ในกรณีที่ผ่านมาผลึก

ผ่านผลึก LiNbO <sub>3</sub>		
ภาพที่	I (mW) ก่อนผ่านผลึก	I (mW) หลังผ่านผลึก
 1	2.79	1.88
 2	2.67	1.89
 3	2.79	1.91
 4	2.75	1.92
 5	2.69	1.93
เฉลี่ย	2.74	1.91

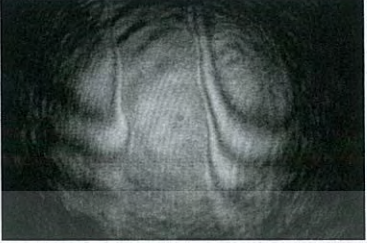


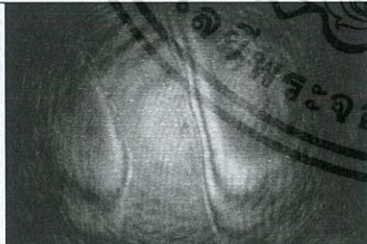
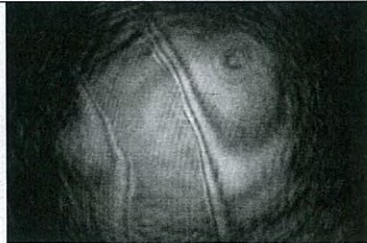
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ภาพเปลวเทียนและค่าความเข้มแสงที่วัดได้ในกรณีที่ไม่ผ่านผลึก

ไม่ผ่านผลึก LiNbO <sub>3</sub>	
ภาพที่ภาพ	I (mW)
 1	3.84
 2	4.09
 3	3.71
 4	4.01
 5	3.82
เฉลี่ย	3.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ภาพเปลวเทียนและค่าความเข้มแสงที่วัดได้ในกรณีที่ผ่านมาผลึก

ผ่านผลึก LiNbO <sub>3</sub>		
ภาพที่	I (mW) ก่อนเข้าผลึก	I (mW) หลังผ่านผลึก
 1	3.16	1.94
 2	3.23	2.01
 3	3.24	2.01
 4	3.23	2.12
 5	3.40	2.06
เฉลี่ย	3.25	2.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลที่ได้ตั้งแต่ ตารางที่ 4.2-4.5 จะเห็นได้ว่า ภาพของวัตถุทั้ง 2 คือ ตัวอักษร K บนแผ่นกลาสไลด์และเปลวเทียน ที่กล้อง CCD สามารถถ่ายได้นั้นจะมีความแตกต่างกันอยู่ในแต่ละกรณีของการทดลอง ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

- ภาพที่ถ่ายได้จากการทดลองที่ ไม่มีการนำ ผลึกลิเทียมไนโอเบต ไปวางกั้นแสงก่อนเข้ากล้องไว้นั้น จะเห็นรูปวัตถุชัดที่สุดในกรณีของตัวอักษร K จะเห็นภาพเป็นตัว K ได้ชัดเจน ซึ่งภาพที่เห็นจะมี 2 ส่วน ส่วนแรกคือแถบลายพื้นหลังของตัวอักษร K นั่นคือริ้วของแสงเรเฟอเรนซ์ และแสงจากวัตถุซึ่งก็คือตัวอักษร K นั่นเอง ส่วนภาพรูปเปลวเทียนนี้ ภาพแห่งตรงกลางคือ ไล้เทียนและเปลวเทียนจะเห็นเป็น ริ้วความร้อนเป็นริ้วแถบสว่างสลับกับแถบมืด

- ภาพที่ถ่ายเมื่อให้แสงที่จะเข้ากล้องผ่านผลึกลิเทียมไนโอเบต จากตารางผลการทดลองจะสามารถสังเกตเห็นริ้วขนาดเล็กที่ตัดทับบนภาพของวัตถุคือภาพตัวอักษร K หรือเปลวเทียนเหมือนกัน โดยลักษณะริ้วคือจะมีรูปร่างที่เป็นเส้นโค้งมีทิศทางเฉียงขึ้นไปทางด้านบนขวาของภาพ

เมื่อสังเกตผลที่ได้มาจากตารางทั้ง 4 จะเห็นได้ว่าภาพที่บันทึกได้โดยกล้อง CCD มีความแตกต่างกัน พิจารณาจากองค์ประกอบของแสงที่ตกกระทบบกล้อง CCD พบว่า โดยปกติเมื่อทำการบันทึกผล ภาพที่ได้จะมี องค์ประกอบของแสง 2 อย่างคือแสงเรเฟอเรนซ์และแสงจากวัตถุดังตารางที่ 4.2 และ 4.4 และเมื่อทำการวางผลึกลงไปตำแหน่งตามการจัดอุปกรณ์พบว่ามีอีก 1 องค์ประกอบของภาพเพิ่มเข้ามาคือ ริ้วโค้งที่โค้งไปทางขวาบนของภาพ ดังตารางที่ 4.3 และ 4.5 ริ้วที่เกิดขึ้นมาจากการที่ผลึกสะสมพลังงานจากแสงที่ตกกระทบทำให้เกิดการเรียงตัวของโมเลกุลภายในกลายเป็นเกรตติงภายในผลึกจากผลดังกล่าวทำให้ทราบว่าริ้วที่เกิดขึ้นก็คือภาพโฮโลแกรมที่ผลึกบันทึกเอาไว้ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่ว่าผลึกจะทำการบันทึกภาพโฮโลแกรมเอาไว้ในการทดลองนี้สิ่งที่ผลึกบันทึกไว้ได้คือเกรตติงภายในนั่นเอง

#### 4.2.2 การใช้ผลึก LiNbO<sub>3</sub> บันทึกโฮโลแกรมโดยใช้การจัดแบบ อินไลน์ โดยมีวัตถุในภาพ 1 ชิ้น คือ หัวธนูบัตรรี

จากผลการทดลองที่ 4.2.1 ภาพที่ได้นั้นไม่มีความชัดเจนมากจนถึงขั้นสามารถแยกได้ชัดเจนว่า ริ้วที่เกิดเป็นภาพโฮโลแกรมที่ผลึกบันทึกไว้ได้ อันเนื่องมาจากการจัดอุปกรณ์การทดลองที่มีการผ่านอุปกรณ์ทางแสงมากมายทำให้ ความเข้มแสงถูกลดทอนลงไปเรื่อยๆ ในการทดลองที่ 4.2.2 นี้จะใช้การจัดอุปกรณ์แบบ อินไลน์ ข้อดีคือ ความเข้มแสงจะไม่ถูกลดทอนลงไปจากการที่แสงผ่านตัวอุปกรณ์มากนัก และยังจัดตั้งได้ง่าย



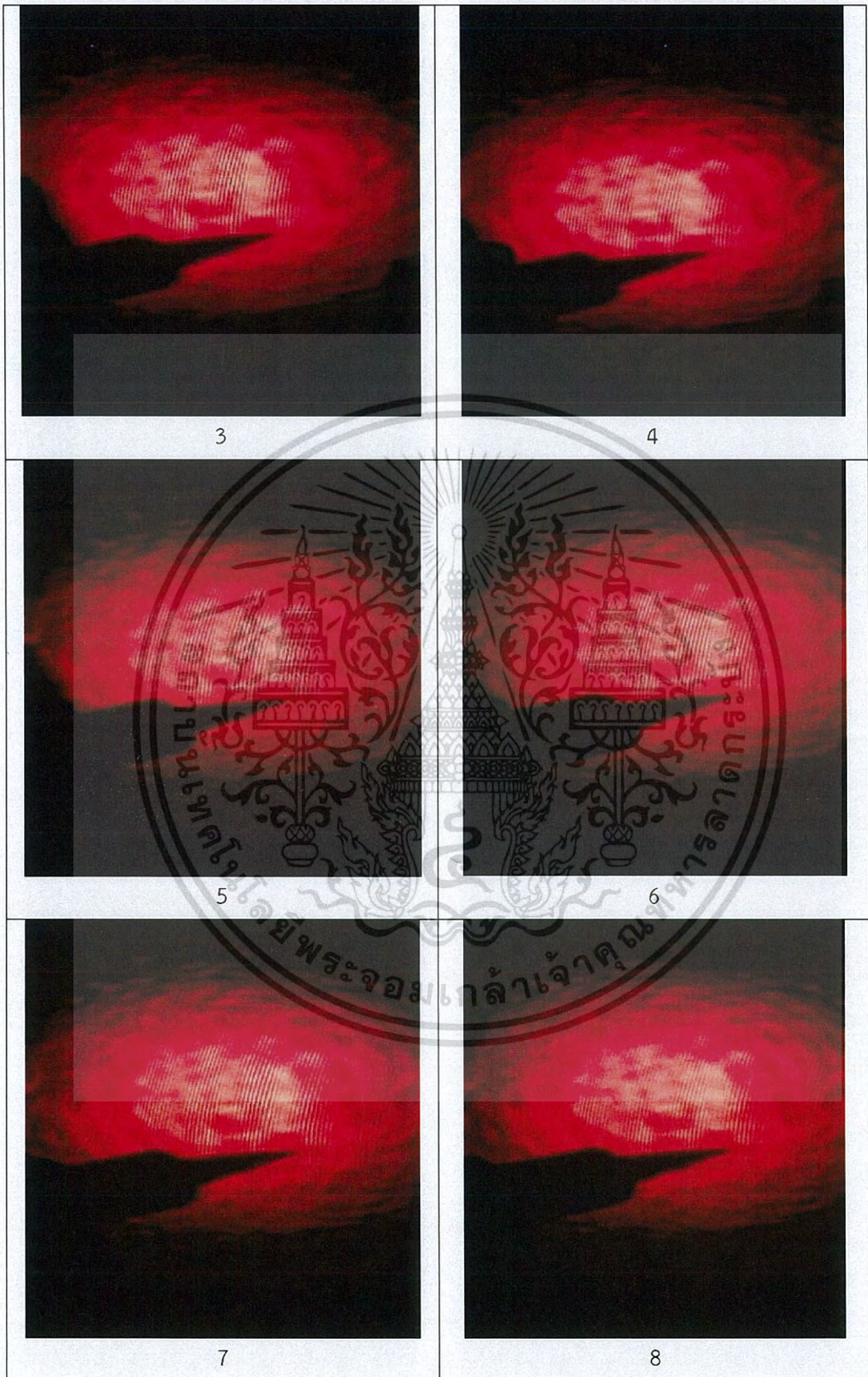
รูปที่ 4.4 การจัดอุปกรณ์แบบ อินไลน์

เมื่อจัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า ได้ตัดอุปกรณ์ทางแสงออกไปหลายชิ้น โดยเฉพาะอุปกรณ์แยกลำแสงที่เป็นตัวลดทอนแสงอย่างมาก ในการทดลองนี้ เราจะดูผลที่เกิดขึ้นแบบ Real-time ภาพที่ได้จะถูกบันทึกเป็นวิดีโอซึ่งเมื่อนำเข้าโปรแกรมแปลงไฟล์วิดีโอเป็นภาพแล้วจะได้ภาพดังตารางที่ 4.6 ซึ่งมีทั้งหมด 24 ภาพ จากวิดีโอทั้งหมดความยาว 30 วินาที จะสังเกตเห็นได้ว่า ในภาพทั้งหมดนั้นจะเห็น ริว ที่มีลักษณะโค้งไปทางขวาอย่างชัดเจน และในรีวที่เกิดขึ้น จะเห็นว่า มีแถบมืดสว่างสลับกันไป ซึ่ง เป็นการย้าผลที่เกิดกับในการทดลอง 4.2.1 ว่ารีวที่เกิดขึ้นคือ เกรตติงภายในผลึกลิเทียมไนโอเบตนั่นเอง

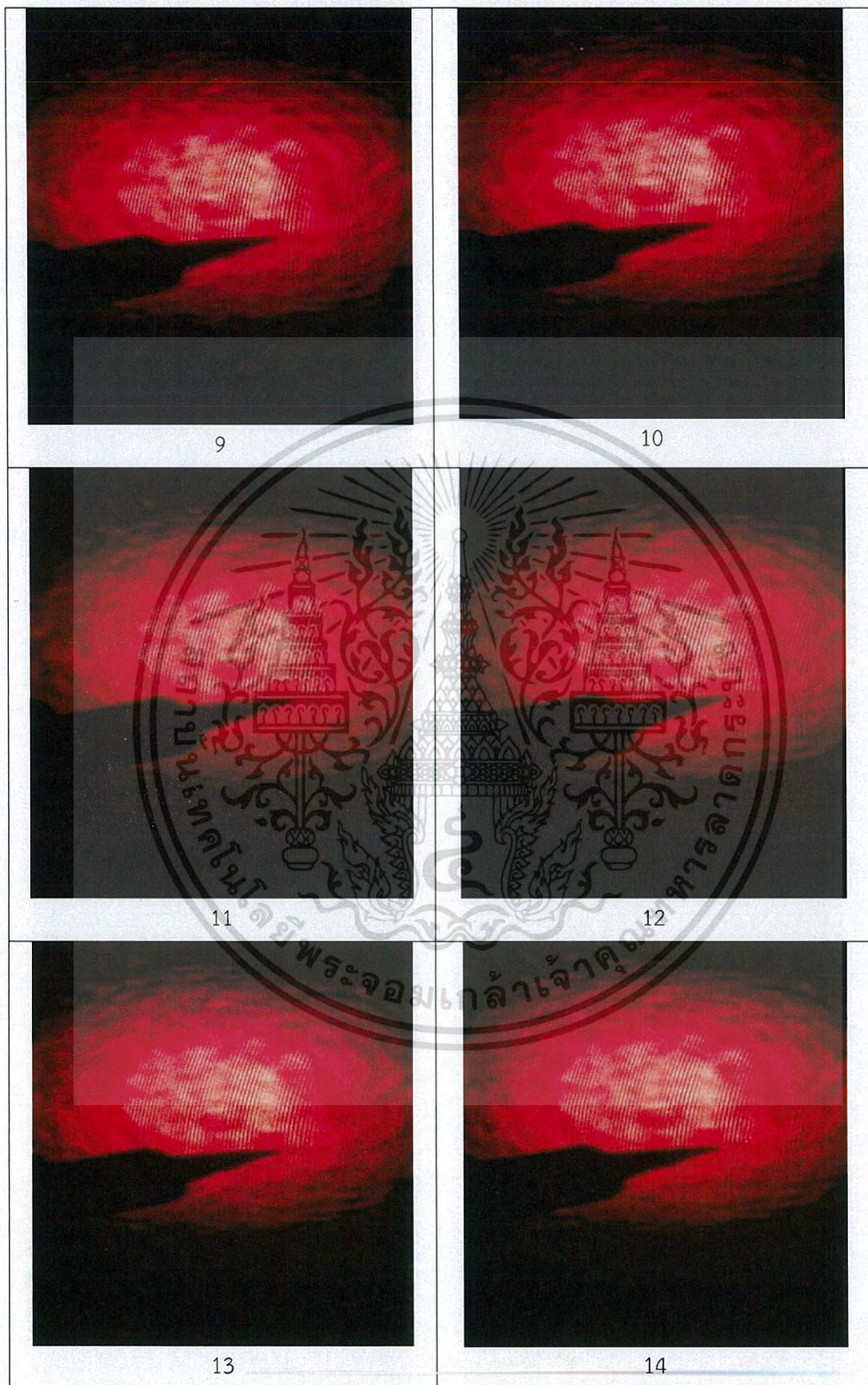
ตารางที่ 4.6 แสดงภาพโฮโลแกรมที่ผลึกบันทึกเอาไว้ได้เป็นรีวขนาดเท่ากันที่มีส่วนที่เป็นแถบมืดและสว่างสลับกัน



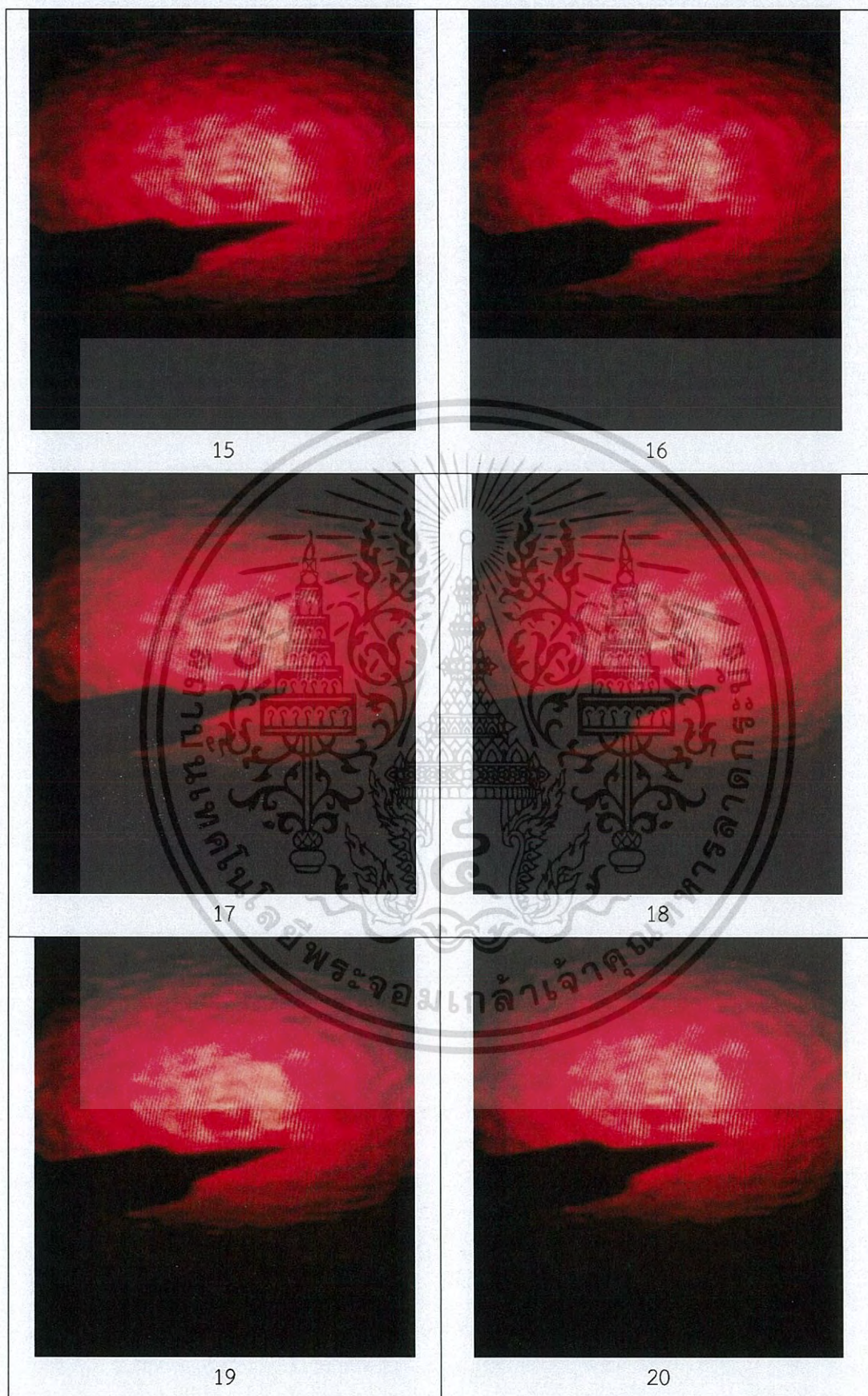
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



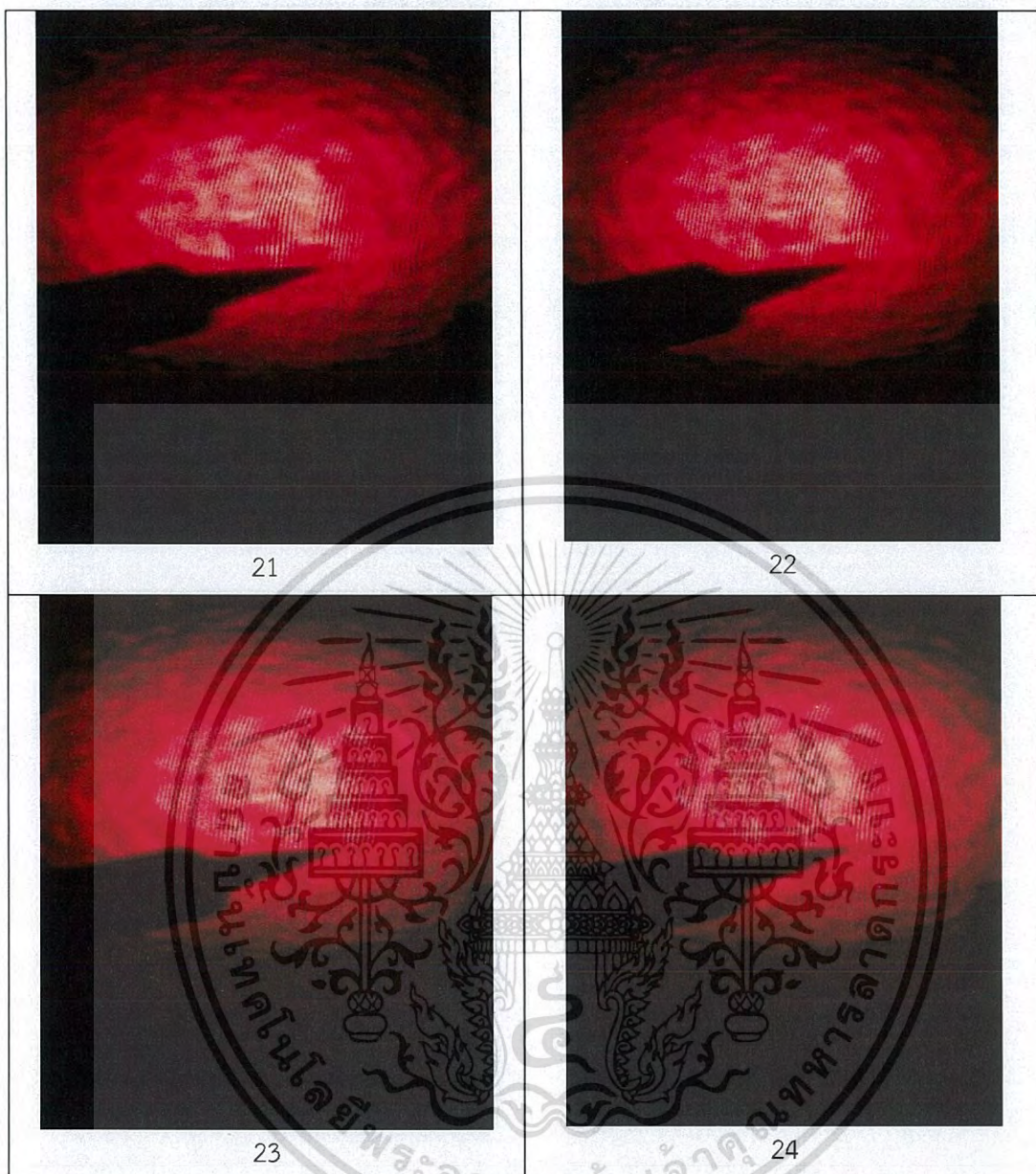
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากตารางที่ 4.6 ที่มีรูปภาพทั้งหมด 24 รูปเรียงตามอักษร 1-24 แต่ละรูปจะเห็นว่าภาพมีองค์ประกอบ 2 อย่างคือ เงาของหัวแร้งที่มีไอรอน และ ริวที่เป็นเส้นโค้งเฉียงขึ้นไปทางขวาบน ดังเช่นผลของการทดลองที่ 4.2.1 ที่จะเห็นริวลักษณะคล้ายกันนี้ แต่ในตารางที่ 4.6 นี้เราจะเห็นเพิ่มมาอีกว่าในพื้นที่ที่เป็นริวนั้นจะมีตำแหน่งที่เป็นส่วน แฉก มีด-สว่างสลับกันอยู่ ซึ่งสิ่งที่ปรากฏนี้คือ เกรตตั้งภายในผลึกที่ผลึกสามารถบันทึกเอาไว้ได้ ที่เห็นได้ชัดเจนนี้เพราะว่า ในระบบแบบ in-line นั้นได้ทำการตัดอุปกรณ์บางตัวออกทำให้เกิดการสูญเสียความเข้มแสงน้อยที่สุดสุดท้าย และหากสังเกตตรงริวแสงบริเวณเหนือปลายหัวแร้งดังเช่นภาพ 3, 4, 8, 12, 16, 17, 18 จะเห็นว่ามีความมืดของภาพของริวแสงบริเวณนั้น เนื่องจากไออากาศร้อนที่แผ่มาจากหัวแร้งเกิดการสั่นไหวเนื่องจากการเป่าลมใส่ให้อากาศบริเวณนั้นสั่นไหว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อทำการวัดความเข้มแสงของภาพที่เกิดด้วยเครื่องวัดความเข้มแสงทุกๆ 10 วินาที เป็นเวลาทั้งหมด 600 วินาที พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป ความเข้มแสงจะมีค่าลดลงซึ่งได้ผลตามตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงความเข้มแสงที่ลดลงต่อเวลา

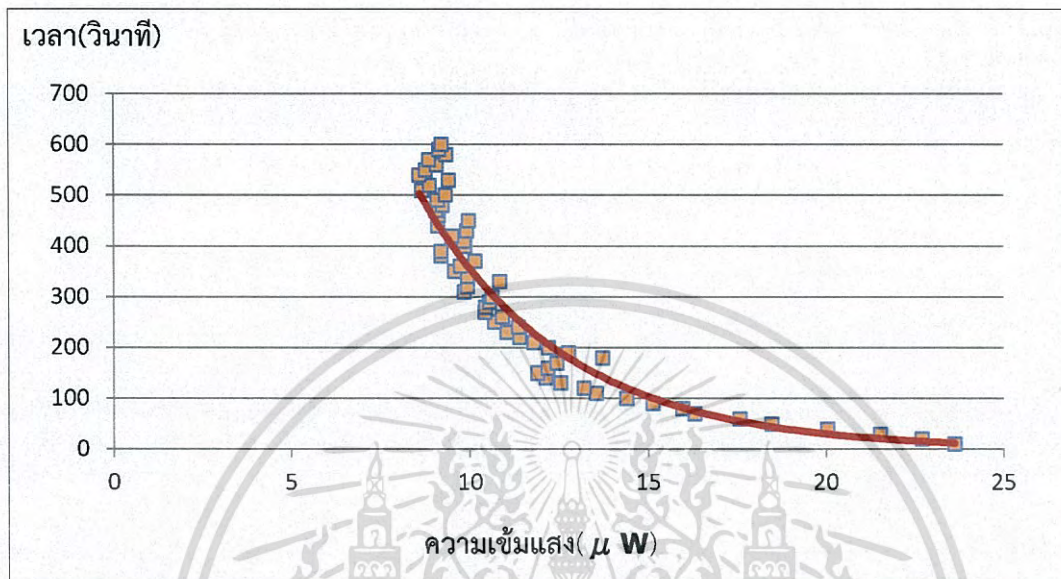
ความเข้มแสง( $\mu\text{W}$ )	เวลา(วินาที)
23.62	10
22.7	20
21.53	30
20.04	40
18.48	50
17.58	60
16.31	70
15.96	80
15.14	90
14.4	100
13.54	110
13.21	120
12.56	130
12.14	140
11.91	150
12.2	160
12.44	170
13.73	180
12.77	190
12.22	200
11.8	210
11.4	220
11.04	230
11.36	240
10.7	250
10.91	260

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.42	270
10.44	280
10.55	290
10.63	300
9.85	310
9.93	320
10.84	330
9.94	340
9.57	350
9.75	360
10.15	370
9.2	380
9.2	390
9.86	400
9.84	410
9.5	420
9.92	430
9.11	440
9.97	450
9.13	460
9.05	470
9.24	480
9.1	490
9.32	500
8.66	510
8.88	520
9.42	530
8.59	540
8.76	550
9.07	560
8.86	570
9.34	580

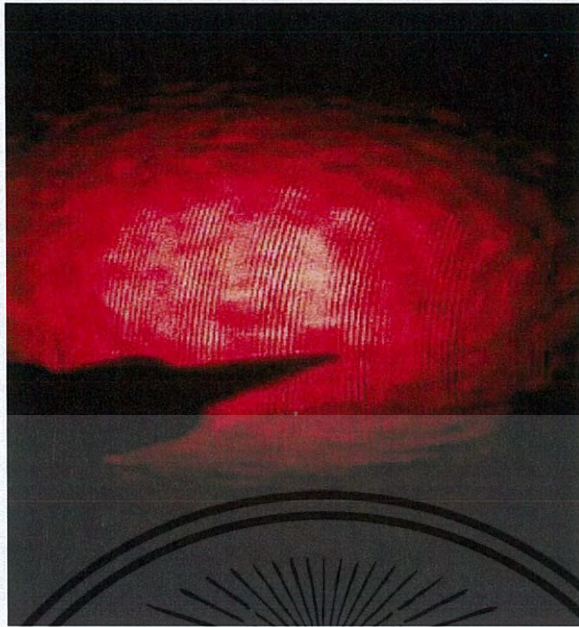
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.14	590
9.21	600



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ ความเข้มแสงที่ลดลง( $\mu\text{W}$ ) ต่อเวลา(วินาที)

จากกราฟในช่วงแรกที่เริ่มจับเวลาเราจะยังไม่เห็นลวดลายแสงที่เกิดจากหัวแร่(ไอความร้อนที่ลอยออกมาเป็นเส้นจากหัวแร่)เมื่อเวลาผ่านไปจนค่าความเข้มแสงไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงมากนักที่เวลา 300 วินาทีขึ้นไป ก็จะเริ่มสังเกตเห็นลวดลายแสงของไอความร้อนที่เกิดจากหัวแร่แบบเรียลไทม์ นั่นคือจุดที่เกรตติงที่เกิดขึ้นในผลึกมีความอึดตัวและกลายเป็นเกรตติงเรียบร้อยแล้วดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงริ้วเกรตติงที่เกิดขึ้นในผลึกลิเทียมไนโอเบต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟของผลึก ลิเทียมไนโอเบต ( $\text{LiNbO}_3$ ) และเป็นการนำผลึกลิเทียมไนโอเบตมาประยุกต์ใช้งานเป็นตัวบันทึกภาพโฮโลแกรม ซึ่งสามารถสรุปได้เป็นหัวข้อย่อยดังนี้

##### 5.1.1 การเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟในผลึก ลิเทียมไนโอเบต

ผลึกลิเทียมไนโอเบตเป็นผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟในตระกูลเพียโรอิเล็กตริก เป็นตระกูลผลึกที่มีราคาสูงที่สุดในทั้งหมด 3 ตระกูล แต่ข้อเสียคือการตอบสนองต่อแสงนั้นไม่ค่อยดี จากการทดลองที่ผ่านมาพบว่า หน้าผลึกทั้ง 4 หน้าของผลึก ลิเทียมไนโอเบต สามารถที่จะเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟได้ทั้งหมด แต่คุณภาพที่เกิดขึ้นไม่เท่ากัน จะเห็นว่าหน้าผลึกที่ 3 และ 4 นั้นเกิดได้ดีกว่าหน้า 1 และ 2 เพราะวาระนาบของผลึกมีค่าไม่เท่ากันซึ่งจะมีค่ามากที่สุดที่หน้า 3 และ 4 จึงทำให้ Beam Transfer หน้า 3 และ 4 มีความเข้มมากที่สุดดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงความเข้มแสงที่เกิดจากปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟของผลึกลิเทียมไนโอเบต

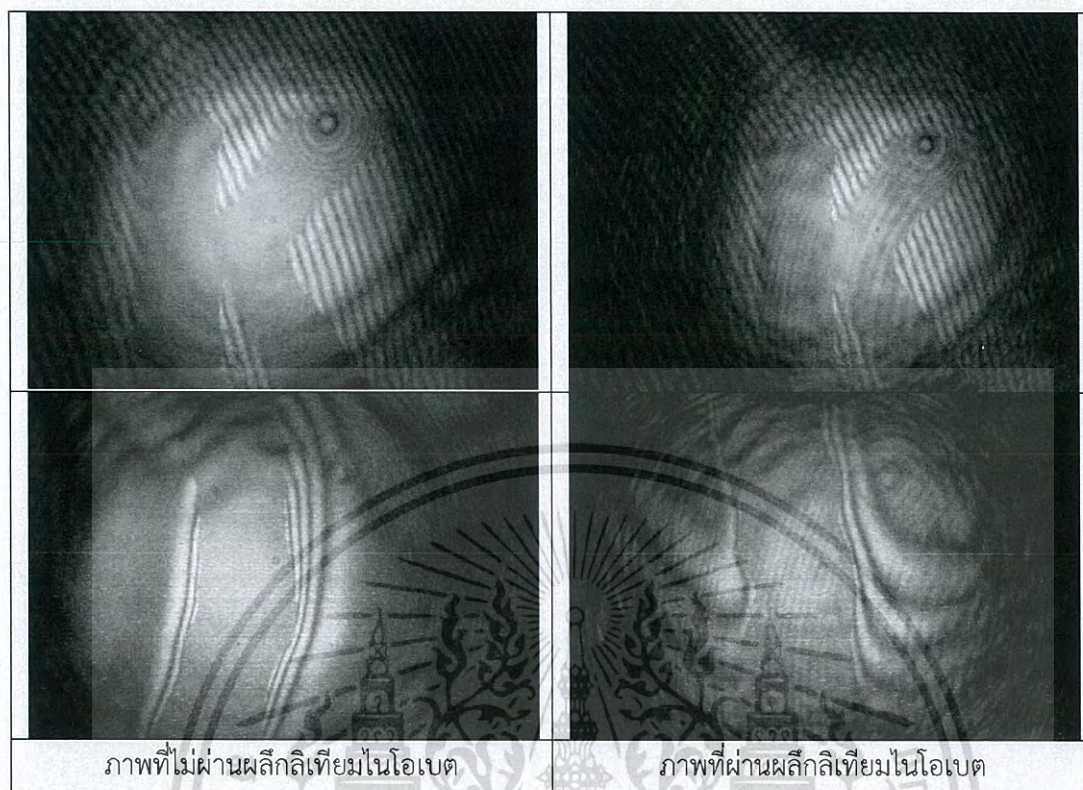
หน้าที่	ความเข้มแสง (nW)			เฉลี่ย (nW)
1	4.09	3.96	4.19	4.08
2	3.91	4.50	4.25	4.22
3	19.30	10.51	7.04	12.28
4	22.80	10.82	5.99	13.20

##### 5.1.2 การประยุกต์ใช้ผลึกลิเทียมไนโอเบตในการบันทึกภาพโฮโลแกรม โดยการจับอุปกรณ์การทดลองแบบ ไมเคิลสัน

ผลึกลิเทียมไนโอเบตเมื่อนำมาให้พลังงานโดยการฉายแสงลงไปบนผลึกจะเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ ซึ่งผลของปรากฏการณ์นี้คือ โมเลกุลในผลึกจะจัดเรียงตัวเองตามแนวสนามไฟฟ้าเป็นแถบ มีด-สว่างสลับกัน นั่นก็คือเกรตติงภายในผลึก ซึ่งเกรตติงนี้จะถูกผลึกบันทึกไว้ในตัวผลึกเอง เมื่อนำผลึกที่ถูกกระตุ้นแล้วมาถ่ายด้วยกล้อง CCD ดังการทดลองตอนที่ 2 โดยการจัดการทดลองแบบไมเคิลสัน ภาพที่ได้จะแสดงให้เห็นถึงริ้วเกรตติงที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นเส้นโค้งมีทิศทางไปทางบนขวาของฉากหลัง เมื่อแยกองค์ประกอบของภาพที่ได้ในแต่ละภาพพบว่าภาพต้นแบบที่ไม่มีการใส่ผลึกลิเทียมไนโอเบตลงไปในระบบจะมีเพียงภาพของแสงอ้างอิงและ แสงจากวัตถุและเมื่อทำการวางผลึกลิเทียมไนโอเบตลงไปในระบบแล้วภาพที่ได้จะมีริ้วดังกล่าวเพิ่มเข้ามาด้วยดังตารางที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

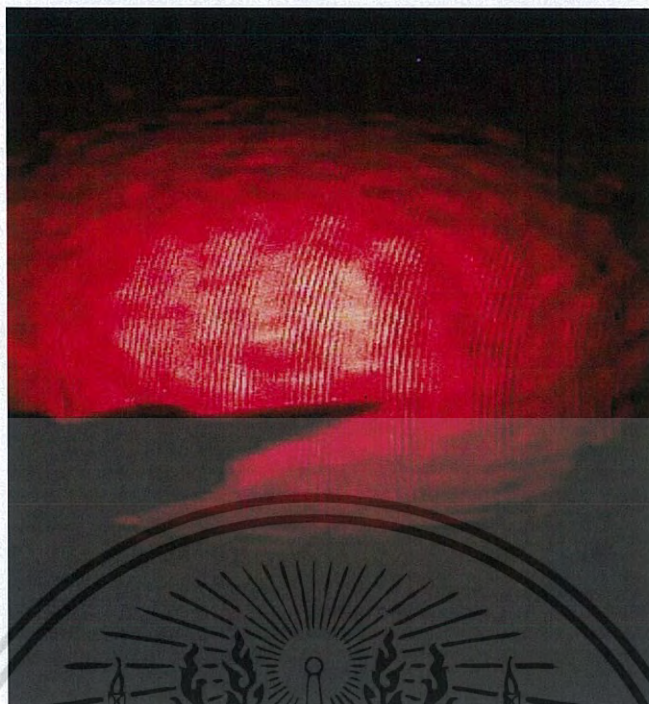
ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบภาพที่ได้ระหว่างภาพที่ผ่านผลึกและไม่ผ่านผลึก



แต่เนื่องจากว่าการจัดการทดลองแบบไมเคลสันนั้นความเข้มแสงของภาพที่จุดสุดท้ายมีค่าน้อยเกินไปที่จะสามารถระบุจำแนกได้ว่าริ้วโค้งที่เกิดขึ้นคือเกรตติงภายในผลึกเทียมไนโอเบตดังนั้นจึงได้ทำการทดลองตอนที่ 3 เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน

### 5.1.3 การประยุกต์ใช้ผลึกเทียมไนโอเบตในการบันทึกภาพโฮโลแกรม โดยการจับอุปกรณ์การทดลองแบบ In-line

ในการจัดการทดลองแบบ In-line ได้มีการตัดอุปกรณ์การทดลองออกไปส่วนหนึ่งทำให้ภาพที่ได้มีความคมชัดกว่าภาพที่ได้จากการจัดการทดลองแบบไมเคลสันดังรูปที่ 5.1 ที่แสดงให้เห็นถึงริ้วโค้งของเกรตติงที่เกิดในผลึกได้อย่างชัดเจนซึ่งจะสังเกตเห็นเป็นริ้วโค้งที่มีแถบมืด-สว่าง สลับกันภายในริ้วโค้งซึ่งจากทฤษฎีแล้วการทดลองนี้คือการให้ผลึกเทียมไนโอเบตเป็นตัวบันทึกภาพโฮโลแกรมที่เกิดขึ้นแทนการใช้แผ่นฟิล์มถ่ายรูปซึ่งเกรตติงที่เกิดขึ้นนี้คือสิ่งที่ผลึกสามารถบันทึกเอาไว้ได้ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ริ้วโค้งที่เกิดขึ้นนี้คือภาพโฮโลกราฟิกนั่นเอง



รูปที่ 5.1 แสดงริ้วเกรตติงที่เกิดขึ้นในผลึกลิเทียมไนโอเบต

## 5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัย

ตอนที่ 1 ควรจะทำให้แสงเป็นลำขนานเพื่อให้สามารถสังเกตการเกิดปรากฏการณ์ได้ง่าย และควรให้แสงจาก Beam Transfer อยู่ตรงกลางพาวเวอร์มิเตอร์เพื่อที่จะวัดค่าความเข้มแสงได้อย่างแม่นยำ

ตอนที่ 2 รูปถ่ายควรมีขนาดใหญ่ เพราะถ้าขนาดของรูปมีขนาดเล็กจะทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นเกรตติงภายในผลึกได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Philippe Lemaire and Marc Gorges Center Spatial de Liege, Avenue du Pre Aily, 4031 Angleur, Belgium ; Dynamic Holographic Interferometry : Devices and Application
- [2] Ching-Cherng Sun, Ren-Han Tsou, Jenq-Yang Chang, and Ming-Wen Chang ; Real-time photorefractive interferometry for dynamic phase perturbation by self-interference in  $\text{LiNbO}_3$
- [3] Gregor Cedilnik, Matthias Esselbach, Armin Kiessing, and Richard Kowarschik ; Real-time holographic interferometry with double two-wave mixing in photorefractive crystal
- [4] Bruno Pouet and Sridhar Krishnaswamy ; Dynamic holographic interferometry by photorefractive crystals for quantitative deformation measurements
- [5] Thomas R. Moore, Rex L. Blair, Anthony J. Megofna, Mark P. Riegner, and Barry L. Shoop ; Holographic interferometers with photorefractive recording media
- [6] Peter Gunter and jean-pierre Huignard (Eds.) ; Photorefractive Materials and Their Applications 2
- [7] Peter Gunter and jean-pierre Huignard (Eds.) ; Photorefractive Materials and Their Applications 3
- [8] Rittirong Nuansri ; Multi Higher, Order Anisotropic Self. Diffraction in Cerium Doped Barium Titanate Crystal

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายบัณฑิต เลิศศรีปรียา  
 วัน เดือน ปีเกิด 17 มิถุนายน 2536  
 ที่อยู่ปัจจุบัน 183 ซ.วชิรธรรมสาธิต 26 แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพมหานคร 10260  
 ประวัติการศึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2558  
 กรุงเทพฯ คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์

ชื่อ นายอมเรศ ศากยวงศ์  
 วัน เดือน ปีเกิด 7 กรกฎาคม 2537  
 ที่อยู่ปัจจุบัน 3/219 หมู่บ้านอยู่เจริญ ซ.เลียบคูนายกิม 43 ถ.เลียบคูนายกิม สาย 1  
 แขวงสีกัน เขตดอนเมือง กทม. 10210  
 ประวัติการศึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2558  
 กรุงเทพฯ คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้