

การศึกษาวิธีการส่งผ่านความเข้มแสงสำหรับตรวจสอบลักษณะ  
เกรตติงของผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟ

PROPERTY INVESTIGATION OF PHOTOREFRACTIVE  
CRYSTAL USING TRANSPORT OF INTENSITY  
TECHNIQUE

มณีรัตน์ พึ่งประเสริฐ

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2561

PROPERTY INVESTIGATION OF PHOTOREFRACTIVE  
CRYSTAL USING TRANSPORT OF INTENSITY  
TECHNIQUE


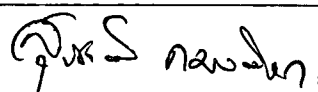
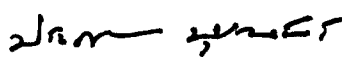
MANEERAT POUNGPRASERT

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 2018

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาวิธีการส่งผ่านความเข้มแสงสำหรับตรวจสอบลักษณะ  
 เกรตติงของผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟ  
 Property Investigation of Photorefractive Crystal Using  
 Transport of Intensity Technique

ชื่อนักศึกษา นางสาวณิรัตน์ พึ่งประเสริฐ รหัสนักศึกษา 58051125  
 ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
 ภาควิชา ฟิสิกส์  
 ปีการศึกษา 2561  
 อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ประธาน บุรณศิริ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้  
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)  
 ประจำปีการศึกษา 2561

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

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาวิธีการส่งผ่านความเข้มแสงสำหรับตรวจสอบลักษณะ เกรตติงของผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟ
ชื่อนักศึกษา	นางสาวมณีนรัตน์ พึ่งประเสริฐ รหัสนักศึกษา 58051125
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. ประธาน บุรณศิริ

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาวิธีการสร้างและการตรวจสอบลักษณะเกรตติงแบบแบรกก์ภายในผลึก  
ลิเทียมไนโอเบตที่เจือด้วยอะตอมเหล็ก ขนาด 7 ลูกบาศก์มิลลิเมตร โดยการใช้แสงเลเซอร์ฮีเลียม  
นีออนความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร และแยกลำแสงเลเซอร์เป็นสองลำแสงซึ่งมีโพลาไรซ์ตั้งฉากกัน  
โดยแยกลำแสงหนึ่งเป็นสองลำสำหรับการสร้างเกรตติงบนผลึกโดยให้แทรกสอดกันและมีมุมระหว่าง  
ของแสงตกกระทบ ( $2\theta$ ) เท่ากับ  $43.03$  องศา ที่ทำให้เกิดเกรตติงที่มีประสิทธิภาพดี จากนั้นจึง  
นำวิธีการส่งผ่านความเข้มแสงมาตรวจสอบลักษณะเกรตติงด้วยลำแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนแนว  
โพลาไรซ์แกนนอน โดยบันทึกภาพในระนาบจุดโฟกัสและจุดก่อนและหลังในระนาบโฟกัส แล้วจึงนำ  
ภาพไปประมวลผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยหลักการสมการการส่งผ่านความเข้มแสง เพื่อดู  
ลักษณะเกรตติงที่เกิดในผลึกลิเทียมไนโอเบต

คำสำคัญ : เกรตติง ปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ ผลึกลิเทียมไนโอเบต วิธีการส่งผ่านความเข้มแสง

<b>Title</b>	Property Investigation of Photorefractive Crystal Using Transport of Intensity Technique
<b>Students</b>	Miss Maneerat Pongprasert Student ID 58051125
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Applied Physics)
<b>Department</b>	Physics
<b>Faculty</b>	Science
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
<b>Academic Year</b>	2018
<b>Advisor</b>	Asst.Prof Dr. Prathan Buranasiri

### Abstract

The purpose of this special project is to investigate Bragg gratings within iron doped lithium niobate crystals with a size of seven cubic millimeters. Two vertically polarized helium-neon laser beams with a wavelength of 633 nm were used for writing the grating in the crystal with the incident angle ( $2\theta$ ) between both beams equal to 43.03 degrees. Then the transport of intensity method was used to explore the grating characteristics by using another horizontally polarized helium-neon laser beam. Images in focus and defocus before and after the focal plane was recorded on a canon digital camera. Then, these images were used to process by computer programming based on the principle of transport of intensity equation. By using this technique the grating characteristics in lithium niobate crystals would be investigated.

**Keywords :** Grating, Photorefractive Effect, Lithium niobate crystals, Transport of intensity

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาและความร่วมมือของทุกๆท่าน ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ประธาน บุรณศิริ ที่คอยให้คำปรึกษาและคำแนะนำ แนวคิด ตลอดจนการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆมาโดยตลอด จนโครงการพิเศษเล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ ขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาที่ให้คำปรึกษาในเรื่องต่างๆ รวมทั้งการให้กำลังใจ เป็นแรงผลักดันในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ที่ช่วยให้คำแนะนำเกี่ยวกับการแก้ปัญหาในการทำงานวิจัยและการให้กำลังใจที่ตีมาเสมอ ผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

มณีนรัตน์ พึ่งประเสริฐ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
คำย่อ/สัญลักษณ์ .....	ณ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขต.....	2
1.4 แผนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 ปรากฏการณ์ Photorefractive effect .....	4
2.1.1 แบบจำลองการเคลื่อนย้ายประจุในแถบชั้นพลังงาน .....	4
2.1.2 การรวมคลื่นภายในตัวกลาง Photorefractive.....	7
2.1.3 เงื่อนไขของแบรกก์ (Bragg condition).....	7
2.2 การส่งผ่านความเข้มแสง (Transport of Intensity) .....	8
2.2.1 สมการการส่งผ่านความเข้มแสง (Transport of Intensity Equation).....	8
2.2.2 ความยาวระยะเรย์ลีห์ (Rayleigh length).....	10
2.3 ผลึกลิเทียมไนโอเบต Lithium Niobate (LiNbO <sub>3</sub> ).....	11
2.4 ฮีเลียมนีออนเลเซอร์ (He - Ne Laser) .....	11
2.4.1 โครงสร้างของ He-Ne Laser.....	12
2.4.2 ระบบการเกิด He-Ne Laser .....	13
2.5 เลนส์.....	14
2.5.1 เลนส์เว้า .....	14
2.5.2 เลนส์นูน.....	14
2.6 CCD.....	15

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	15
<b>บทที่ 3</b> วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	<b>17</b>
3.1 การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมปรากฏการณ์ Photorefractive effect ในผลึก Fe: LiNbO <sub>3</sub> .....	17
3.1.1 การทดลองเพื่อหาด้านของผลึก Fe:LiNbO <sub>3</sub> ที่เกิดปรากฏการณ์ Photorefractive effect.....	17
3.1.2 การทดลองเพื่อศึกษาหามุมตกกระทบของลำแสงแทรกสอดในการสร้าง เกรตติงจากปรากฏการณ์ Photorefractive effect.....	19
3.2 การทดลองเพื่อศึกษาวิธีการส่งผ่านความเข้มแสงโดยการจัดการทดลอง แบบทะลุผ่านในระบบ 4f.....	21
<b>บทที่ 4</b> ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....	<b>26</b>
4.1 ผลการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ Photorefractive effect ในผลึก Fe:LiNbO <sub>3</sub>	26
4.1.1 ผลการทดลองเพื่อหาด้านของผลึก Fe: LiNbO <sub>3</sub> ที่เกิดปรากฏการณ์ Photorefractive effect.....	26
4.1.2 การทดลองเพื่อศึกษาหามุมตกกระทบของลำแสงแทรกสอดในการสร้าง เกรตติงจากปรากฏการณ์ Photorefractive effect.....	28
4.2 ผลการทดลองการศึกษาวิธีการส่งผ่านความเข้มแสงโดยการจัดการทดลอง แบบทะลุผ่านในระบบ 4f เพื่อดูการสร้างเกรตติงภายในผลึก Fe: LiNbO <sub>3</sub> .....	29
<b>บทที่ 5</b> สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	<b>38</b>
เอกสารอ้างอิง .....	39

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.4 แผนการดำเนินงานวิจัย .....	2
2.1 ตารางแสดงคุณสมบัติของผลึกลิเทียมไนโอเบต Lithium Niobate (LiNbO <sub>3</sub> ) .....	11
4.1 ความเข้มแสงที่ทะลุผ่านในมุมตกกระทบที่กำหนด.....	28
4.2 แสดงภาพที่บันทึกครั้งที่ 1 ในระยะ focus และ defocus ของเกรตติงที่เกิดจาก ปรากฏการณ์ Photorefractive effect ในผลึก Fe : LiNbO <sub>3</sub> .....	31
4.3 แสดงภาพที่บันทึกครั้งที่ 2 ในระยะ focus และ defocus ของเกรตติงที่เกิดจาก ปรากฏการณ์ Photorefractive effect ในผลึก Fe : LiNbO <sub>3</sub> .....	32
4.4 แสดงภาพที่บันทึกครั้งที่ 3 ในระยะ focus และ defocus ของเกรตติงที่เกิดจาก ปรากฏการณ์ Photorefractive effect ในผลึก Fe : LiNbO <sub>3</sub> .....	33

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	4
2.2	6
2.3	7
2.4	9
2.5	10
2.6	12
2.7	13
2.8	14
2.9	15
3.1	18
3.2	18
3.3	20
3.4	20
3.5	22
3.6	23
3.7	24
3.8	25
4.1	27
4.2	27
4.3	29
4.4	35

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 รูปที่ (1) – (5) แสดงขนาดของเฟสที่คำนวณได้ $\varphi_{-2}, \varphi_{-1}, \varphi_0, \varphi_1, \varphi_2$ ตามลำดับ โดยมากจากความเข้มแสง $I_{-3}, I_{-2}, I_{-1}, I_0, I_1, I_2, I_3$ คำนวณด้วยวิธีการ TIE.....	36
4.6 รูปที่ (1) - (3) การคำนวณความเข้มแสงใหม่ $I'_{-1}, I'_0, I'_1$ ตามลำดับ โดยคำนวณมาจาก เฟส $\varphi_{-2}, \varphi_{-1}, \varphi_0, \varphi_1, \varphi_2$ .....	37
4.7 แสดงขนาดของเฟสสุดท้าย $\varphi'_0$ ถูกแก้ไขด้วยการคำนวณความเข้มแสงใหม่ จาก $I'_{-1}, I'_0, I'_1$ .....	37

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
TI	วิธีการส่งผ่านความเข้มแสง
TIE	สมการวิธีการส่งผ่านความเข้มแสง
PR	ปรากฏการณ์โพโตรีแฟรกทีฟ
LiNbO <sub>3</sub>	ลิเทียมไนโอเบต
He-Ne Laser	ฮีเลียม-นีออน เลเซอร์
BS	Beam splitter
PBS	Polarized beam splitter
CCD	Charge Coupled Device
a	ระยะห่างจาก beam splitter ถึงหน้าผลึก
b	ระยะห่างจาก beam splitter ถึงกระจกบานที่ 1
M <sub>1</sub>	กระจกบานที่ 1
M <sub>2</sub>	กระจกบานที่ 2
M <sub>3</sub>	กระจกบานที่ 3
L <sub>1</sub>	เลนส์นูนตัวที่ 1
L <sub>2</sub>	เลนส์นูนตัวที่ 2
L <sub>3</sub>	เลนส์นูนตัวที่ 3
-ΔZ	ระยะภาพก่อนจุดโฟกัส
+ΔZ	ระยะภาพหลังจุดโฟกัส

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ (Photorefractive effect) ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อปีค.ศ. 1966 Arthur Ashkin เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการส่งผ่านลำแสงเลเซอร์ในผลึกอิเล็กโตรออปติก (Electrooptic Crystal) ปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟเป็นปรากฏการณ์ที่เมื่อมีความเข้มแสงเข้ามาในวัสดุตัวกลาง แล้วทำให้ดัชนีหักเหในตัวกลางมีการเปลี่ยนแปลง ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นเมื่อฉายแสงเลเซอร์ ซึ่งเป็นที่มีคุณสมบัติความเป็นโคฮีเรนต์ (Coherent light) แยกเป็นสองลำแสง แล้วให้มาตกกระทบกันในมุมที่เหมาะสม ซึ่งลำแสงทั้งสองลำจะเกิดการแทรกสอดกัน (Interference Pattern) กันในผลึก แล้วทำให้เกิดแถบมืดแถบสว่างขึ้น อิเล็กตรอนจะเคลื่อนตัว จากแถบสว่างที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนมากไปบริเวณแถบมืดที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนน้อย ทำให้เกิดการแพร่เป็นแถบขั้วประจุบวกและแถบขั้วประจุลบแยกกัน ภายหลังขั้วบวกจะเคลื่อนที่เข้าหากัน เกิดการเหนี่ยวนำเป็นสนามไฟฟ้า สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแถบคาบ ซึ่งภายในแถบคาบจะมีการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหที่มีค่าแตกต่างกัน ทำให้เกิดลักษณะเป็นเกรตติงเรียกว่า Refractive Index Grating ซึ่งเป็นปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟสามารถอธิบายได้ด้วยสมการของ Kukhtarev

ในปีค.ศ. 1998 Paganin และ Nugent เสนอวิธีการส่งผ่านความเข้มแสง (Transport of Intensity) เป็นวิธีการถ่ายภาพของเฟสแบบไม่แทรกสอดด้วยแสงโคฮีเรนต์ เมื่อคลื่นแสงทะลุวัตถุตัวกลางทำให้ความเข้มแสงและเฟสมีการเปลี่ยนแปลง การอ้างอิงถึงแสงที่ส่องผ่านวัตถุจะทำให้เกิดความง่ายในการบันทึกความเข้มแสงและเฟส จึงพบว่าเฟสสามารถวัดได้จากความเข้มแสงที่ระยะการแพร่แตกต่างกัน เทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสง (Transport of Intensity Equation) จึงเป็นการทดลองทางแสงอย่างง่ายในการถ่ายบันทึกภาพที่ความเข้มแสงแตกต่างกันรอบบริเวณจุดโฟกัสแล้วรูปภาพที่ได้ทั้งความเข้มแสงและเฟสจะถูกนำไปคำนวณควบคู่กัน เพื่อที่จะได้ภาพที่ชัดเจนและละเอียดยิ่งขึ้น

โครงการพิเศษนี้มีความสนใจที่จะศึกษาระบบวิธีการส่งผ่านความเข้มแสง (Transport of Intensity) โดยการสร้างเกรตติงภายในผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟ (Photorefractive crystal) สามารถทำได้ด้วยปรากฏการณ์ Photorefractive effect ลักษณะเกรตติงที่เกิดขึ้นไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เราจึงได้ทำการศึกษาสมการและวิธีการทดลองวิธีการส่งผ่านความเข้มแสง เพื่อให้ทราบถึงลักษณะของเกรตติงภายในผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาหลักการเกิดปรากฏการณ์ Photorefractive effect
- 2) เพื่อศึกษาหลักการและสมการวิธีการส่งผ่านความเข้มแสงแสง (Transport of intensity)
- 3) เพื่อศึกษาการนำวิธีการส่งผ่านความเข้มแสงไปใช้ในการตรวจสอบลักษณะเกรตติงใน Photorefractive crystal

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ Photorefractive effect
- 2) ศึกษาการสร้างเกรตติงใน Photorefractive crystal แบบ Bragg
- 3) ศึกษาหลักการวิธีการส่งผ่านความเข้มแสง (Transport of intensity)
- 4) นำวิธีการส่งผ่านความเข้มแสงมาตรวจสอบลักษณะเกรตติงใน Photorefractive crystal

## 1.4 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	เดือน						
	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.
ศึกษาทฤษฎีปรากฏการณ์ Photorefractive effect	■	■					
ศึกษาสมการและหลักการของวิธีการส่งผ่านความเข้มแสง	■	■					
ทำการทดลองสร้างเกรตติงใน Photorefractive crystal			■	■	■	■	
ทำการทดลองติดตั้งอุปกรณ์แบบวิธีการส่งผ่านความเข้มแสงในการตรวจสอบลักษณะเกรตติง				■	■	■	
วิเคราะห์ผลข้อมูล					■	■	■
รวบรวมผลข้อมูล						■	■
สรุปผล							■
จัดทำรูปเล่ม							■

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

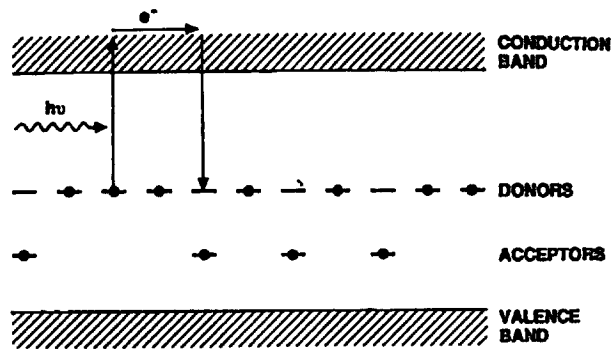
- 1) ได้เรียนรู้ทฤษฎีและวิธีการส่งผ่านความเข้มแสง (Transport of Intensity)
- 2) ได้ทราบถึงวิธีการประมวลผลภาพหาลักษณะของเกรตติงที่เกิดขึ้นใน Photorefractive crystal

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ปรากฏการณ์ Photorefractive effect

#### 2.2.1 แบบจำลองการเคลื่อนย้ายประจุในแถบชั้นพลังงาน



รูปที่ 2.1 แบบจำลองการเคลื่อนย้ายประจุในแถบชั้นพลังงาน

ปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรคทีฟ (Photorefractive Effect) สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการเคลื่อนย้ายประจุในแถบชั้นพลังงาน เมื่อพิจารณารูปแบบอย่างง่ายที่ใช้อธิบายการสังเกตปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรคทีฟ ภายในรูปแบบ ตัวกลางของโฟโตรีแฟรคทีฟจะถูกสมมติให้เป็นสารไม่บริสุทธิ์ (สารเจือ) เพื่อให้ง่ายต่อการอธิบาย สมมติให้สารเจือผู้ให้ (Donor) มีลักษณะเหมือนกันและมีชั้นพลังงานที่แน่นอนบริเวณใดบริเวณหนึ่งที่อยู่ตรงกลางบริเวณแบนด์แกป (Bandgap) การดูดกลืนโฟตอนของแสงด้วยสารเจือผู้ให้ สมการการเกิดความหนาแน่นของไอออนผู้ให้ ( $N_D^i$ ) คือ

$$\frac{\partial N_D^i}{\partial t} = sI(N_D - N_D^i) - \gamma_R NN_D^i \quad (2.1)$$

โดย  $N_D$  หมายถึง ความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้ ( $\text{atom}/\text{cm}^3$ )

$N_D^i$  หมายถึง ความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้ ( $\text{atom}/\text{cm}^3$ )

$N$  หมายถึง ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ ( $\text{atom}/\text{cm}^3$ )

$S$  หมายถึง ภาตตัดขวางในตัวกลางจากการกระตุ้นด้วยแสง ( $\text{cm}^3$ )

$I$  หมายถึง ความเข้มแสง ( $\text{mW}/\text{cm}^2$ )

$\gamma_R$  หมายถึง อัตราการรวมตัวกันใหม่ระหว่างกับดักที่ไอออนกับอิเล็กตรอน

$sI(N_D - N_D^i)$  หมายถึง สมการอัตราการเกิดอิเล็กตรอนอิสระ

$\gamma_R N N_D^i$  หมายถึง สมการอัตราการจับอิเล็กตรอนของสารเจือที่เป็นไอออนหรือกับดัก (Trap)

เมื่อเติมสารเจือใหม่ลงไปในพื้นที่ว่าง ไอออนของสารเจือปลดปล่อยอิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนจะถูกจับใหม่อีกครั้ง อัตราการเกิดอิเล็กตรอนเท่ากับอัตราการเกิดไอออนของสารเจือ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระมีผลต่อความหนาแน่นของอิเล็กตรอน สมการอัตราความหนาแน่นของอิเล็กตรอน คือ

$$\frac{\partial N}{\partial t} - \frac{\partial N_D^i}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot j \quad (2.2)$$

โดย  $j$  หมายถึง ความหนาแน่นกระแส ( $A/cm^2$ )

$q$  หมายถึง ประจุของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ  $1.602 \times 10^{-19}$  คูลอมบ์

จากสมการแสดงให้เห็นว่าอิเล็กตรอน ทำให้เกิดขอบเขตที่ว่างประจุ (Space-charge field) ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของประจุพาหะ ดังนั้นความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอนจะมีส่วนที่เกิดจากการไหลของประจุพาหะเนื่องจากสนามไฟฟ้าและการแพร่เนื่องจากความหนาแน่นประจุพาหะสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$J = qN\mu E + k_B T \mu \nabla N \quad (2.3)$$

โดย  $\mu$  หมายถึง สภาพความคล่องอิเล็กตรอน ( $m^2/V-s$ )

$E$  หมายถึง สนามไฟฟ้า ( $N/C$ )

$k_B T$  หมายถึง ผลคูณค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann) กับอุณหภูมิ ( $J/mol$ )

และอธิบายสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามสมการปัวส์ซอง (Poisson equation)

$$\nabla \cdot \epsilon E = \rho(r) = -q(N + N_A - N_D^i) \quad (2.4)$$

โดย  $\epsilon$  หมายถึง สภาพความยอมไฟฟ้า ( $C/N-m$ )

$\rho(r)$  หมายถึง ความหนาแน่นประจุ ( $C/m^3$ )

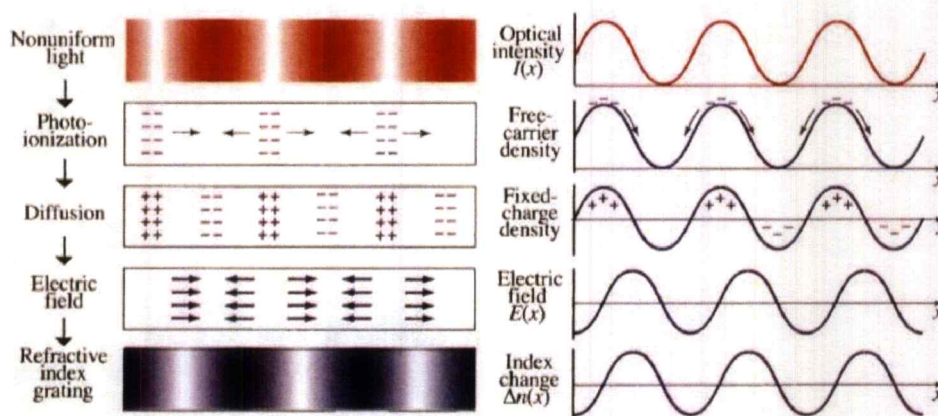
$N_A$  หมายถึง ความหนาแน่นของสารเจือผู้รับ ( $atom/m^3$ )

เมื่อพิจารณาขณะที่ฉายลำแสงเลเซอร์เข้าสู่ตัวกลางโฟโตรีแฟรกทีฟ ในบริเวณที่มีความสว่างประจุที่แตกตัวเป็นไอออน (Photoionized charge) เกิดจากการดูดกลืนโฟตอน (Photon) และอิเล็กตรอนสามารถกระจายออกไปบริเวณที่มีความสว่าง ผลจากการส่องสว่างแสงที่มีความเป็นโคฮีเรนต์ลงบนตัวกลางโฟโตรีแฟรกทีฟ จะเกิดแถบมืดแถบสว่าง บริเวณแถบสว่างจะมีประจุบวกอยู่มาก บริเวณแถบมืดจะมีประจุลบอยู่มาก แล้วเกิดการแยกที่ว่างประจุ (Space-charge) เกิดขึ้นอย่าง

ต่อเนื่องจนกระทั่งการกระจายของกระแส (Diffusion current) มีความสมดุลกับการไหลของกระแส (Drift current) ขอบเขตที่ว่างมีความสัมพันธ์กับความเข้มแสงและขอบเขตที่ว่างประจุนี้ไปเหนี่ยวนำให้ค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลางเปลี่ยนแปลงตามปรากฏการณ์ของพอคเคิล (Pockel' effect) การกระจายตัวของประจุจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าขึ้นภายในตัวกลาง แล้วไปส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเฟสขึ้น การเปลี่ยนแปลงเฟสนั้นก็จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหภายในตัวกลางที่เกิดมีลักษณะเป็นคาบคล้ายลักษณะเกรตติงเรียกว่า Refractive index grating จากสมการที่ (2.1) ถึง (2.4) ด้านบนทั้งหมดเป็นสมการของ Kukhtarev

ปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟสามารถกล่าวกระบวนการเกิดโดยสรุปดังนี้

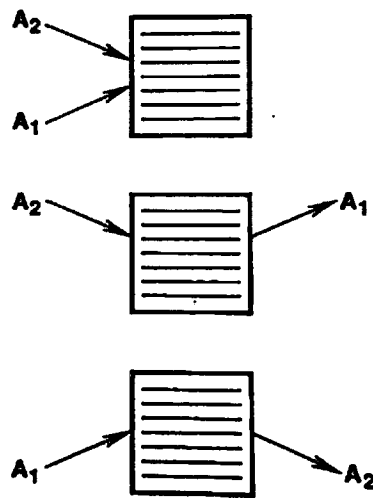
1. เมื่อฉายแสงเลเซอร์สองลำทำมุมตกกระทบหน้าพื้นผิววัตถุ จะเกิดการแทรกสอด (Interference Pattern) ทำให้เกิดแถบมืดแถบสว่าง
2. เกิดโฟโตไอออไนเซชัน (Photoionization) มีอิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้น โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากแถบสว่างไปยังแถบมืด
3. เกิดการแพร่ (Diffusion) จากการที่อิเล็กตรอนอิสระจะเคลื่อนย้ายจากแถบสว่างที่มีความหนาแน่นของจำนวนอิเล็กตรอนมากไปยังแถบมืดที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนน้อยทำให้ที่แถบสว่างมีขั้วประจุบวกและแถบมืดมีขั้วประจุลบมาก แบ่งสลับกันลักษณะเป็นคาบ
4. เกิดการจับประจุพาหะขั้วลบวิ่งเข้าหาขั้วประจุบวก เกิดความหนาแน่นของที่ว่างประจุ
5. เกิดการเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในแต่ละคาบ การเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าที่มีค่าแตกต่างกันในแต่ละคาบ ทำให้ดัชนีหักเหภายในวัตถุตัวกลางแต่ละคาบแตกต่างกัน
6. ค่าดัชนีหักเหที่แตกต่างกัน จะมีลักษณะคล้ายกับเกรตติงจึงเรียกว่า Refractive index grating



รูปที่ 2.2 การเกิดปรากฏการณ์ Photorefractive effect

### 2.1.2 การรวมคลื่นภายในตัวกลาง Photorefractive

เมื่อแสงเลเซอร์สองลำแสงแทรกสอดกันในตัวกลาง Photorefractive การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงในลักษณะคาบ เนื่องจากการแทรกสอดจะไปสร้างปริมาณดัชนีเกรตติง เวกเตอร์คลื่นของเกรตติงของเกรตติงจะได้  $k = \pm (k_2 - k_1)$  เมื่อ  $k_1$  และ  $k_2$  เป็นเวกเตอร์คลื่นของลำแสง ดัชนีหักเหจะมีผลต่อการแพร่ของสองลำแสง คลื่นจะเลี้ยวเบนมากโดยดัชนีเกรตติง เพราะการกระเจิงแบบแบรกก์จะมีเฟสที่สมบูรณ์ ดังนั้น ลำแสงที่หนึ่งจะกระเจิงด้วยดัชนีเกรตติงและลำแสงที่เลี้ยวเบนจะแพร่ไปตามทิศทางของลำแสงที่สอง เช่นเดียวกันในลำแสงที่สองจะเกิดการกระเจิงด้วยเกรตติงเหมือนกัน และลำแสงที่เลี้ยวเบนจะแพร่ไปตามทิศทางของลำแสงที่หนึ่ง ในรูปที่ 2.3 ซึ่งนี่คือการค้ำปึงและการกระเจิงของพลังงาน เรียกว่า เซลฟ์ ดิฟแฟรกชัน (Self-diffraction)



รูปที่ 2.3 การกระเจิงของแบรกก์ (Bragg) เนื่องจากปริมาณเกรตติงตัวกลาง Photorefractive

บน: เกรตติงถูกเหนี่ยวนำด้วยสองลำแสง ( $A_1, A_2$ )

กลาง: ลำแสง  $A_2$  เลี้ยวเบนโดยเกรตติงที่สร้างจากลำแสง  $A_1$

ล่าง: ลำแสง  $A_1$  เลี้ยวเบนโดยเกรตติงที่สร้างจากลำแสง  $A_2$

### 2.1.3 เงื่อนไขของแบรกก์ (Bragg condition)

การเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหถูกสร้างด้วยคลื่นสนามไฟฟ้า แสงที่สะท้อนออกเป็นแนวขนาน จะถูกแบ่งด้วยความยาวคลื่นของเกรตติงที่มีลักษณะเป็นคาบ ( $\Lambda$ ) ซึ่งจะสะท้อนแสงออกมาถ้ามุมที่ตกกระทบ ( $\theta$ ) เป็นไปตามเงื่อนไขของแบรกก์ สำหรับการสร้างรูปแบบการแทรกสอดเป็นไปตามสมการของแบรกก์

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{2\Lambda} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $\lambda$  หมายถึง ความยาวคลื่นของแสงในตัวกลาง

## 2.2 การส่งผ่านความเข้มแสง (Transport of Intensity)

ในอดีตมีวิธีวัดเฟสมากมายที่ถูกเสนอขึ้นมาหลังจากที่มีการประดิษฐ์เลเซอร์ (Laser) ขึ้นมา ตาของมนุษย์สามารถตรวจวัดแอมพลิจูดหรือความสว่างของวัตถุที่เปลี่ยนไปได้ แต่ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของเฟสไม่ได้ การแก้ปัญหาเฟสทางแสงได้ถูกพัฒนาด้วยการสร้างภาพเฟสจากวัตถุและการทำงานด้วยการแปลงลักษณะของเฟสเป็นแอมพลิจูดที่ดวงตาสามารถตรวจวัดได้ ซึ่งจะให้ผลเป็นเชิงคุณภาพ Phase-contrast microscopy คือ เทคนิคทางออปติคคอลลไมโครสโคปีที่แปลงการเลื่อนเฟสในแสงทะลุผ่านตัวอย่างโปร่งแสงด้วยการดูความสว่างของแสงที่เปลี่ยนแปลงไปในรูปภาพถ่าย การประดิษฐ์ของ Zernike ที่ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ เทคนิคนี้จะให้ข้อมูลเฟสเชิงคุณภาพ ซึ่งแบบอื่นจะให้ในเชิงปริมาณ เช่นเทคนิคการวัดแบบอินเตอร์เฟอโรเมตริก (Interferometric) การวัดเฟสเชิงปริมาณสามารถใช้ความเข้มแสงรบกวนรูปภาพผ่านจุดโฟกัส ทั้งแบบเทคนิคอินเตอร์เฟอโรเมตริก (Interferometric) และแบบนอนอินเตอร์เฟอโรเมตริก (non-interferometric) เป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่าสามารถจัดค่าเฟสได้ การใช้วิธีการของ Kalman เป็นอีกหนึ่งวิธีที่จะได้เฟสและแอมพลิจูดและคาดคะเนรูปร่างเท่ากับเมื่อไม่ทราบแหล่งกำเนิดและนี้แสดงให้เห็นถึงความคลาดเคลื่อนระหว่างฟังก์ชันเฟสจริงกับเฟสที่สร้างขึ้นใหม่ด้วยวิธีการของสมการส่งผ่านความเข้มแสง (Transport of Intensity Equation) เพียงเล็กน้อย

การส่งผ่านความเข้มแสง (TI) คือวิธีการแบบนอนอินเตอร์เฟอโรเมตริก (non-interferometric) ที่จะใช้ความเข้มแสงวัดเฟสที่ระนาบของแสงแพร่กระจายแตกต่างกัน Teague ได้เสนอวิธีการแก้ไขปัญหาเฟสที่เกี่ยวข้องกับผลฟังก์ชันของ Green ที่ใช้เทคนิคนอนอินเตอร์เฟอโรเมตริก หลังจาก Teague, Roddier et al. เสนอวิธีการที่ง่ายในการพิสูจน์สมการส่งผ่านความเข้มแสง การกลับคืนของเฟสโดยใช้การส่งผ่านของแสงต้องติดตั้งวิธีการทดลองอย่างง่ายด้วยการวัดความเข้มแสงที่ระนาบแตกต่างกันไปตามทิศทางการแพร่ของสนามทางแสงเช่นด้านหน้าและด้านหลังของระนาบรูปภาพ

### 2.2.1 สมการการส่งผ่านความเข้มแสง (Transport of Intensity Equation)

พิจารณาระนาบของรูปภาพ ซึ่งสามารถเขียนสมการในเทอมของแอมพลิจูดและเฟสได้ดังนี้

$$U(\mathbf{r}) = \sqrt{I(\mathbf{r})} \cdot e^{i\phi(\mathbf{r})} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $\mathbf{r}$  หมายถึง ระนาบ  $(x, y)$

$I$  หมายถึง ความเข้มแสง

$\phi(r)$  หมายถึง การแพร่กระจายของเฟสเชิงพื้นที่ที่เราสนใจ ภายใต้การประมาณของขอบเขตที่เปลี่ยนแปลงช้าๆไปตามแกนออปติคัล การแพร่กระจายจะเป็นไปตามสมการการส่งผ่านความเข้มแสง

$$k_0 \frac{\partial I(r)}{\partial z} = -\nabla[I(r)\nabla\phi(r)] \quad (2.7)$$

เมื่อ  $k_0$  หมายถึง เลขคลื่น,  $k_0 = 2\pi/\lambda$  และ  $\nabla = (\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y})$

ในสมการที่ 2.7 แสดงให้เห็นการแพร่กระจายความเข้มแสงและอนุพันธ์ของแกน ผลข้อมูลของการแพร่กระจายของเฟสตามขวาง การแพร่กระจายความเข้มแสงสามารถตรวจวัดได้โดยตรงที่ระนาบรูปภาพ และอนุพันธ์ในแนวแกน  $z$  จะได้จากจุดเบลอ (defocus) ทั้งด้านแกนบวกและด้านแกนลบของทิศทางแกน  $z$  สมมติว่ามีการกระเจิงในวัตถุ ความเข้มแสงในสมการด้านขวาให้ประมาณค่าเท่ากันและเอาวิธีการ divergence ออกจากสมการที่ 2.7 จะได้

$$\frac{\partial I}{\partial z} = \frac{-I_0}{k_0} \nabla^2 \phi(r) \quad (2.8)$$

เมื่อ  $I_0$  หมายถึง ความเข้มแสงที่แพร่กระจายที่ระนาบโฟกัส

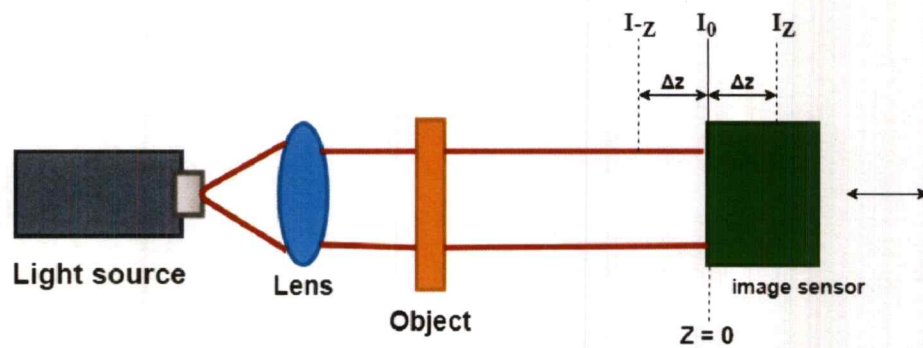
โดยที่สมการที่ 7 แสดงให้เห็นว่าทิศทางกรทดลองจะใช้ลาปลาเซียน (Laplacian) ของ  $\phi$  ด้วยการวัดเกรเดียนต์ตามยาวของความเข้มแสง ในการทดลองการเกรเดียนต์ตามแกน  $z$  จะวัดโดยเลื่อนตัวอย่างด้วยทิศทางเพียงเล็กน้อยตามระนาบโฟกัส จะได้สมการส่งผ่านความเข้มแสง

$$\frac{\partial I(r)}{\partial z} = \frac{1}{2\Delta z} [I(r, \Delta z) - I(r, -\Delta z)] = g(r) \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\Delta z$  หมายถึง ระยะการเลื่อนโฟกัส

$$\varphi(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \frac{k_{x,y}}{k_x^2 + k_y^2} \mathcal{F} \frac{1}{I(x,y,z)} \mathcal{F}^{-1} \frac{k_{x,y}}{k_x^2 + k_y^2} \mathcal{F} \left\{ k_0 \frac{I_{+(x,y,z)} - I_{-(x,y,z)}}{\Delta z} \right\} \quad (2.10)$$

สมการที่ 2.10 เป็นสมการเฟสตามหลักการของ Paganin และ Nugent



รูปที่ 2.4 ระบบการส่งผ่านความเข้มแสง

### 2.2.2 ความยาวระยะเรย์ลีห์ (Rayleigh length)

ในด้านออปติกและเลเซอร์ ความยาวของเรย์ลีห์ (Rayleigh length) หรือแนวของเรย์ลีห์ (Rayleigh range) ( $Z_R$ ) คือระยะทางตามทิศทางการแพร่กระจายของลำแสงจากส่วนคอดของลำแสงเลเซอร์ (beam waist) ไปยังที่ที่พื้นที่ของหน้าตัดขวางมีขนาดกว้างเป็นสองเท่าของส่วนคอด ซึ่งเกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ confocal ซึ่งเป็นสองเท่าของความยาว Rayleigh ความยาวของเรย์ลีห์มีความสำคัญอย่างยิ่งเมื่อมีการสร้างแบบจำลองลำแสงแบบเกาส์เซียนสำหรับลำแสงเกาส์เซียนที่แพร่กระจายในพื้นที่ตามแนวแกน  $z$  ความยาวของเรย์ลีห์จะถูกกำหนดโดย

$$Z_R = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda} \quad (2.11)$$

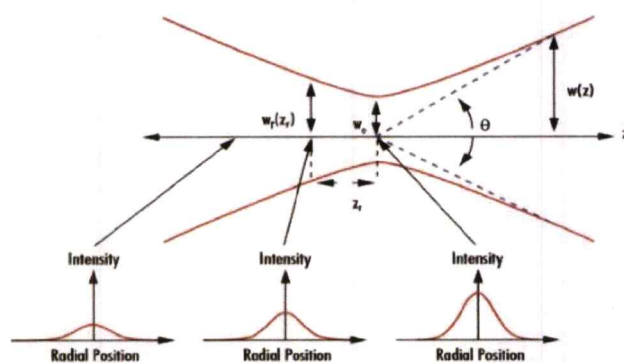
$\lambda$  หมายถึง ความยาวคลื่นแสงเลเซอร์

$\omega_0$  หมายถึง ส่วนคอดของลำแสงเลเซอร์ขนาดรัศมีของลำแสง ณ จุดที่แคบที่สุด สมการนี้จะ

พิจารณาว่าส่วนคอกลำแสงไม่เล็กมาก ;  $\omega_0 = \frac{2\lambda}{\pi}$  รัศมีของลำแสงที่ระยะ  $z$  จากส่วนคอด คือ

$$\omega(z) = \sqrt{1 + \left(\frac{z}{Z_R}\right)^2}$$

ค่าต่ำสุดของ  $\omega(z)$  เกิดขึ้นที่  $\omega(0) = \omega_0$  ตามคำจำกัดความ ที่ระยะ  $Z_R$  จากส่วนคอดลำแสงรัศมีของลำแสงจะเพิ่มขึ้นเป็น  $\sqrt{2}$  และพื้นที่หน้าตัดมีค่าเท่ากับ 2



รูปที่ 2.5 เกาส์เซียนเลเซอร์โดยกำหนดให้ beam waist ( $\omega_0$ ), Rayleigh range ( $z_R$ ), และมุมที่บานออก ( $\theta$ )

### 2.3 ผลึกลิเทียมไนโอเบต Lithium Niobate ( $\text{LiNbO}_3$ )

ผลึกลิเทียมไนโอเบต Lithium Niobate ( $\text{LiNbO}_3$ ) เป็นวัสดุชนิดแรกที่ถูกค้นพบปรากฏการณ์ Photorefractive ผลึกลิเทียมไนโอเบตเป็นแบบพีระมิดฐานสามเหลี่ยม เป็นผลึกที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุ Electro optic, Non-linear optic และ Optic waveguide สามารถนำมาศึกษาปรากฏการณ์ Phase conjugate, ปรากฏการณ์ Photorefractive, ปรากฏการณ์ Dynamic Holography ได้

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงคุณสมบัติของผลึกลิเทียมไนโอเบต Lithium Niobate ( $\text{LiNbO}_3$ )

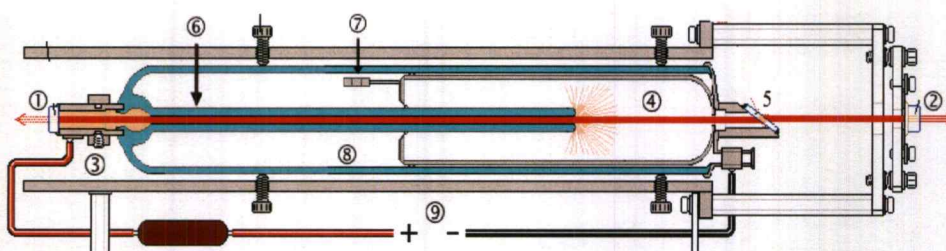
คุณสมบัติ	
สูตรทางเคมี (Chemical formula)	$\text{LiNbO}_3$
สูตรน้ำหนักมวล (Molar mass)	147.846 g/mol
ลักษณะ (Appearance)	ของแข็ง ไม่มีสี
ความหนาแน่น (Density)	4.65 g/cm <sup>3</sup>
จุดหลอมเหลว (Melting point)	1,257 °C (2,295 °F; 1,530 K)
การละลายน้ำ (Solubility in water)	ไม่ละลายน้ำ
แถบพลังงาน (Band gap)	4 eV
ดัชนีหักเห (Refractive index) ( $n_o$ )	$n_o$ 2.30, $n_e$ 2.21

## 2.4 ฮีเลียมนีออนเลเซอร์ (He - Ne Laser)

ฮีเลียมนีออนเลเซอร์ He - Ne Laser เป็นเลเซอร์ชนิดแก๊ส ตัวกลางเป็นแก๊สผสมระหว่างฮีเลียมและนีออนถูกประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกโดย Ali Javan และคณะ ในช่วงปี 1960 เป็นเลเซอร์แสงในย่านอินฟราเรด ความยาวคลื่น  $\lambda = 1150 \text{ nm}$ . ต่อมา A. D. White และคณะ ก็ได้คิดพัฒนาเลเซอร์ที่เกิดในช่วงความยาวคลื่น  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ . (สีแดง) ซึ่งเป็นเลเซอร์ที่นิยมใช้ เพราะมีกำลังขยายการเกิดต่ำและเป็นแสงที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ในปัจจุบันอัตราส่วนที่ใช้ผลิต He-Ne Laser คือ 10 ส่วนของ He ต่อ 1 ส่วนของ Ne

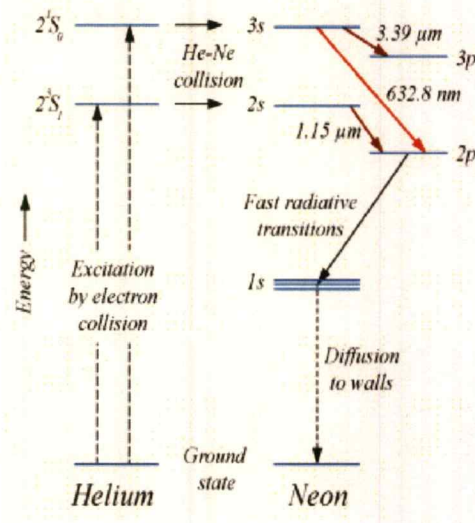
### 2.4.1 โครงสร้างของ He-Ne Laser

1. กระจกด้านหลัง
2. กระจกด้านหน้า กระจกทั้งสองด้านจะสะท้อนให้ลำแสงเลเซอร์ให้กลับเข้าไปในหลอด เหมือนเป็นตัวขยายการเกิดเลเซอร์อย่างต่อเนื่อง โดยแสงเลเซอร์จะออกผ่านกระจกด้านหน้า ที่มีสัมประสิทธิ์การสะท้อนน้อยกว่ากระจกด้านหลัง
3. ขั้วแอโนด (Anode)
4. ขั้วแคโทด (Cathode) มีลักษณะเป็นท่ออะลูมิเนียมทรงกระบอกอยู่ด้านใน ที่เป็นลักษณะแบบนี้ เพื่อให้มีการจ่ายประจุไฟฟ้าหรืออิเล็กตรอนในหลอดให้แก๊สแตกตัวอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ
5. บริวเตอร์วินโดว์ ทำหน้าที่ สะท้อนแสงกลับจากกระจก เข้าไปในหลอดเลเซอร์ ทำให้เลเซอร์เกิดการสูญเสียกำลังน้อยลง มีการขยายและเกิดเลเซอร์ได้ง่ายขึ้น และเป็นตัวกำจัดแสงย่านความยาวคลื่นที่ไม่ต้องการกลับเข้าไป แล้วได้แสงเลเซอร์ที่ต้องการเพียงย่านความยาวคลื่นเดียวออกมา
6. capillary tube เป็นหลอดแก้วรูแคบ ภายในมีแก๊สฮีเลียมและแก๊สนีออนผสมอยู่ การเกิดเลเซอร์จะเกิดภายในนี้
7. Getter ทำหน้าที่ ไว้จับออกซิเจนไม่ให้เกิดออกไซด์ เพื่อยืดอายุการใช้งานของหลอดเลเซอร์
8. หลอดแก้ว
9. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของ He-Ne Laser

## 2.4.2 ระบบการเกิด He-Ne Laser



รูปที่ 2.7 ระบบการเกิด He-Ne Laser

แก๊สผสมฮีเลียม-นีออนภายในหลอดเลเซอร์ มีค่าระดับพลังงานดังรูปที่ 2.7 ที่ปลายหลอดเลเซอร์จะมีอิเล็กโทรด (Electrode) เป็นขั้วบวก (Anode) และขั้วลบ (Cathode) ซึ่งอยู่คนละปลายหลอด ขั้วแอโนดทำด้วยโลหะทังสเตน (tungsten) และขั้วแคโทดเป็นแบบฮอลโลแคโทด (Hollow Cathode) ทำด้วยอะลูมิเนียม เมื่อทำการดีสชาร์จ (discharge) อิเล็กตรอนจากไฟฟ้ากระแสตรงจะวิ่งชนฮีเลียมอะตอม ในชั้นสถานะพื้น (ground state) ทำให้ฮีเลียมอะตอมมีระดับพลังงานสูงขึ้น แล้วถูกกระตุ้นขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงาน 2<sup>3</sup>S และ 2<sup>1</sup>S ตามลำดับ จากนั้นฮีเลียมอะตอมจะชนกับนีออนอะตอมที่ระดับชั้นพลังงาน 3S และ 2S แล้วถ่ายเทพลังงาน นีออนอะตอมจะมีพลังงานสูงขึ้น ในระยะเวลาการอยู่ที่ชั้นพลังงาน 3S และ 2S ของนีออนอะตอมยาวกว่าระยะเวลาการอยู่ที่ระดับชั้น 3P และ 2P จึงเกิดประชากรผกผัน (population inversion) ขึ้นระหว่างระดับ 2S กับ 2P , ระหว่างระดับ 3S กับ 3P และ 2P ตามลำดับ จากนั้นจะเกิด stimulated emission ระหว่าง 3P กับ 3P เกิดแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น  $\lambda = 3390$  nm. (ย่านอินฟราเรด), เกิด stimulated emission ระหว่าง 3P กับ 2P เกิดแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น  $\lambda = 1150$  nm. (ย่านอินฟราเรด) และเกิด stimulated emission ระหว่าง 2P กับ 2P เกิดแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น  $\lambda = 632.8$  nm. (สีแดง) จากนั้นนีออนอะตอมที่ระดับ 3P, 2P จะลดระดับพลังงานอย่างรวดเร็วและไม่มีการแผ่รังสีมาสู่ระดับ 1S และจาก 1S ลงสู่ ground state ด้วยวิธีการวิ่งชนผนังหลอดเลเซอร์ (wall collision)

## 2.5 เลนส์

### 2.5.1 เลนส์เว้า

เลนส์เว้า หมายถึง เลนส์ที่บริเวณขอบมีลักษณะหนา แต่ตรงกลางเลนส์บาง มี 3 ประเภท ได้แก่ เลนส์เว้า 2 หน้า เลนส์เว้าแกมมูน เลนส์เว้าแกมระนาบ โดยการทำงานจะอาศัยหลักการหักเหของแสงเช่นเดียวกับเลนส์นูน แต่จะมีคุณสมบัติกระจายแสงได้ดี ดังนั้น แสงที่ส่องผ่านเลนส์เว้าจะถูกกระจายออกไป หรือทำมุมหักเหออกจากแนวเส้นตั้งฉาก ซึ่งภาพที่ได้จากเลนส์เว้าจะเป็นภาพเสมือนหัวตั้ง ขณะที่ตำแหน่งของภาพอาจอยู่ด้านหน้าเลนส์หรือหลังเลนส์ก็ได้ ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างวัตถุกับเลนส์

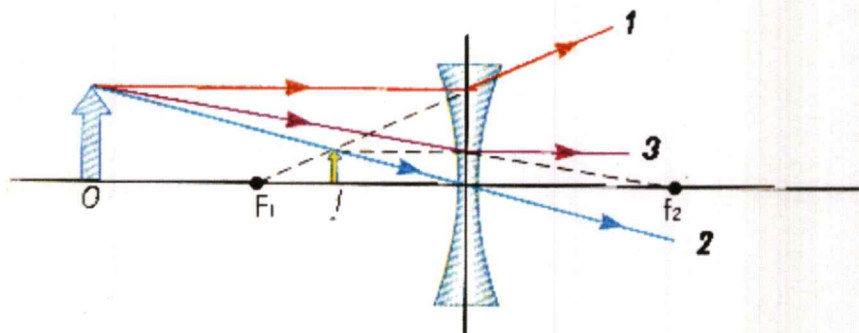
ส่วนประกอบของเลนส์เว้า ตามภาพด้านล่าง

$F_1$  และ  $F_2$  คือ จุดโฟกัสอยู่ด้านหน้าและหลังของเลนส์

เส้นที่ลากผ่านเลนส์ในแนวจุดโฟกัสทั้ง 2 ( $F_1$  และ  $F_2$ ) คือ แกนमुखสำคัญ

$C$  หรือ  $2F$  เป็นจุดศูนย์กลางความโค้งของผิวทั้ง 2 เลนส์เว้า

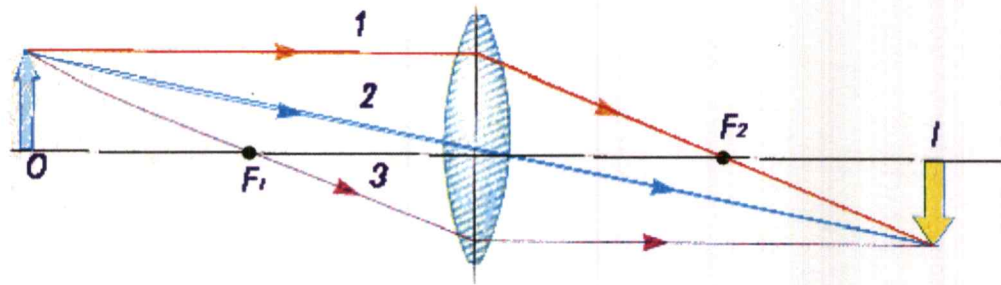
$O$  คือ ตำแหน่งของวัตถุ วางไว้หน้าเลนส์  $I$  คือ ตำแหน่งของภาพที่เกิดจากวัตถุ



รูปที่ 2.8 เลนส์เว้า

### 2.5.2 เลนส์นูน

เลนส์นูน หมายถึง เลนส์ที่บริเวณขอบมีลักษณะบาง แต่บริเวณส่วนกลางของเลนส์นั้นหนา กว่า มี 3 ประเภท ได้แก่ เลนส์นูน 2 หน้า เลนส์นูนแกมเว้า และเลนส์นูนแกมระนาบ โดยการทำงานของเลนส์นูนอาศัยหลักการหักเหของแสง ที่จะหักเหเข้าหาแนวเส้นตั้งฉาก ดังนั้น โดยทั่วไป เลนส์นูนจึงมีคุณสมบัติรวมแสง หรือทำให้แสงที่ส่องผ่านเลนส์นูนทำมุมกันแคบเข้ามา จนอาจมารวมกันเป็นจุดจุดเดียว หรือที่เรียกว่าจุดโฟกัส ซึ่งภาพที่ได้จากเลนส์นูนอาจเป็นภาพจริงหัวกลับหรือภาพเสมือนหัวตั้ง ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างวัตถุกับเลนส์



รูปที่ 2.9 เลนส์นูน

สูตรความยาวโฟกัส 
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} \quad (2.12)$$

โดย โฟกัส  $f$  เป็น + สำหรับเลนส์นูน - สำหรับเลนส์เว้า  
 ระยะวัตถุ  $s$  เป็น+ ทั้งเลนส์นูนและเลนส์เว้า  
 ระยะภาพ  $s'$  เป็น+สำหรับภาพจริง เป็น - สำหรับภาพเสมือน

สูตรกำลังขยาย 
$$M = \frac{I}{O} = \frac{s'}{s} \quad (2.13)$$

## 2.6 CCD

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

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 Arthur Ashkin et al. ค้นพบปรากฏ Photorefractive effect ในผลึก  $\text{LiNbO}_3$  โดยบังเอิญ แล้วจึงได้ทำการศึกษาเรื่องแสงที่เหนียวทำให้เกิดค่าดัชนีหักเหที่แตกต่างกันในผลึก  $\text{LiNbO}_3$  และผลึก  $\text{LiTaO}_3$

2.6.2 D.Paganin และ K.A.Nugent ได้ศึกษาวิธีการแพร่แบบไม่แทรกสอด (noninterferometric) ในการสร้าง imaging และเสนอเป็นวิธีการส่งผ่านความเข้มแสง (TI)

2.6.3 Hongbo Zhang et al. ได้ศึกษาวิธีการ finite difference เป็นวิธีสร้างขอบเขตเงื่อนไขในการช่วยสมการส่งผ่านความเข้มแสงในการสร้างเฟส

2.6.4 Suwan Plaipichit ได้ศึกษาวิธีการตรวจสอบลักษณะเกรตติงที่เกิดขึ้นในผลึก Ce:BaTiO<sub>3</sub> ด้วยวิธีดิจิทัลโฮโลกราฟีแบบอินไลน์

2.6.5 Mahmudunnabi Basunia ได้ศึกษาความลึกของรูลูกเต๋า ด้วยวิธีการส่งผ่านความเข้มแสง (Transport of Intensity Equation) โดยติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองวิธีการส่งผ่านความเข้มแสงแบบสะท้อนหน้าลูกเต๋า แล้วบันทึกภาพด้วยกล้อง CCD ใช้ระยะในการเลื่อนกล้อง 0.05 มิลลิเมตร โดยบันทึกภาพความเข้มแสงทั้งหมด 7 ภาพ แล้วนำไปแปลงเป็นเฟส แล้วนำเฟสสุดท้ายไปคำนวณหาความลึกของรูลูกเต๋า

2.6.6 Thanthanat Srisuwan ได้ศึกษาและออกแบบวิธีการส่งผ่านความแสงสำหรับการตรวจสอบการกัดกร่อนบนพื้นผิวโลหะผสม Co-Fe, สแตนเลสชนิด AISI 304 และสแตนเลส AISI 420 และเปรียบเทียบกับวิธีการตรวจสอบโดยวิธีของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะอธิบายถึงวิธีการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ ในโครงการพิเศษนี้มีการทดลองทั้งหมด 2 ขั้นตอน คือ ตอนที่ 1 จะศึกษาพฤติกรรมปรากฏการณ์ Photorefractive effect ในผลึก Fe: LiNbO<sub>3</sub> โดยจะทดลองหาด้านผลึก LiNbO<sub>3</sub> ที่จะทำให้เกิดเกรตติงจากปรากฏการณ์ Photorefractive effect และหามุมแสงเลเซอร์ 2 ลำแสงแทรกสอดที่ทำให้เกิดแสงทะลุผ่าน (Beam Transfer) มากที่สุด ตอนที่ 2 จะศึกษาวิธีการส่งผ่านความเข้มแสงโดยจัดการทดลองแบบทะลุผ่านในระบบ 4f ในการตรวจวัดลักษณะเกรตติงที่เกิดภายในผลึก Fe:LiNbO<sub>3</sub> โดยรายละเอียด ดังนี้

#### ตอนที่ 3.1 การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมปรากฏการณ์ Photorefractive effect ในผลึก Fe: LiNbO<sub>3</sub>

แบ่งการทดลองย่อยเป็นอีก 2 ขั้นตอน คือ

##### ตอนที่ 3.1.1 การทดลองเพื่อหาด้านของผลึก Fe:LiNbO<sub>3</sub> ที่เกิดปรากฏการณ์ Photorefractive effect

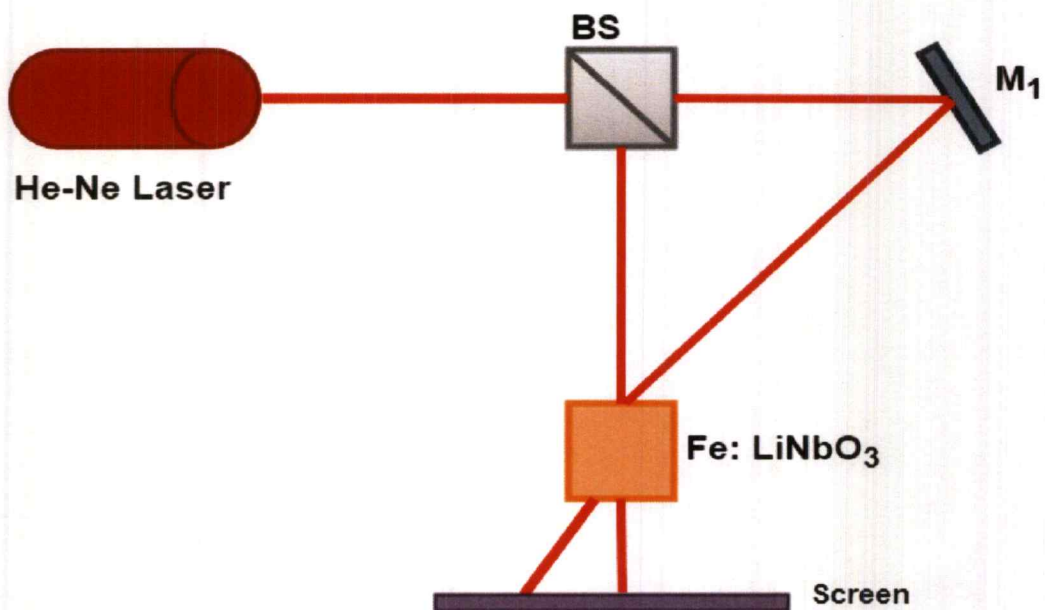
###### อุปกรณ์การทดลอง

1. เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน (He-Ne Laser) ความยาวคลื่น 632.8 nm. 12 mW
2. ผลึก Fe: LiNbO<sub>3</sub>
3. Beam splitter อัตราส่วน 50:50
4. กระจก
5. แท่นวางผลึก
7. ฉากรับแสง

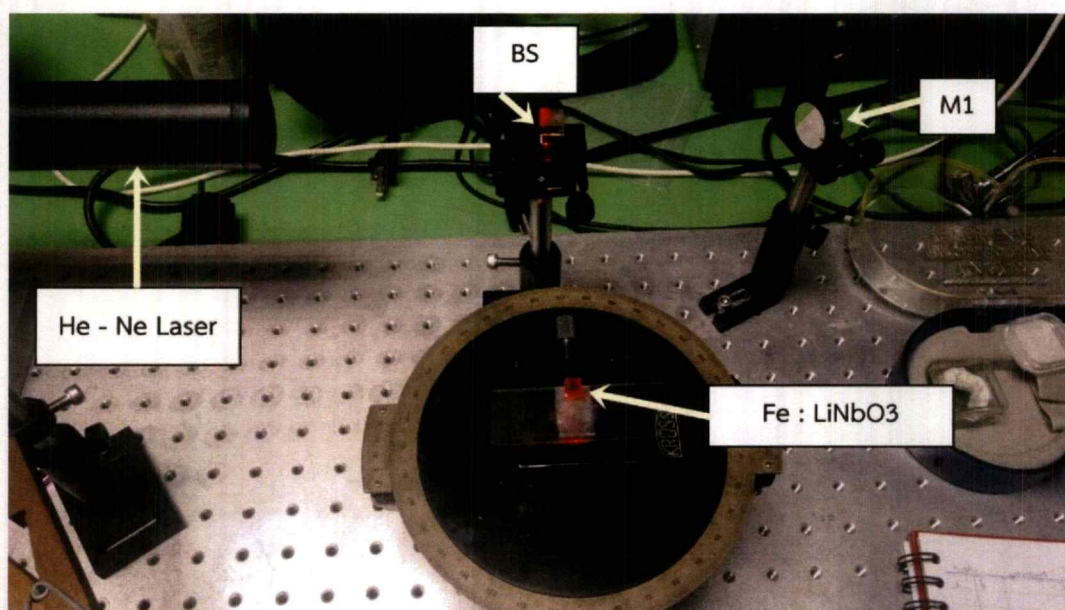
###### วิธีการทดลอง

1. จัดเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนให้แนวลำแสงขนานกันตลอดระยะนาบ
2. นำ Beam Splitter มาวางไว้หน้าระยะนาบลำแสงเลเซอร์เพื่อให้ทำให้แสงเลเซอร์แยกออกเป็นสองลำแสง
3. นำกระจกมาวางเพื่อให้สะท้อนลำแสงที่แยกออกมา ให้สะท้อนกับไปรวมกับลำแสงอีกลำ
4. นำผลึก Fe: LiNbO<sub>3</sub>วางบนแท่นหน้าลำแสงฉายผ่าน จัดลำแสงทั้งสองลำที่ผ่านผลึกให้เกิดการแทรกสอดกัน
5. สังเกตหน้าผลึก Fe:LiNbO<sub>3</sub> ว่าหน้าใด จะเกิดเกรตติงจากปรากฏการณ์ Photorefractive effect โดยกำหนดเวลาฉายแสงหน้าผลึกนาน 10 นาที

6. นำฉากกันน้ำลำแสงหนึ่งลำ สันเกตการณ์เกิดแสงทะลุผ่าน (Transmission)
7. เปลี่ยนหน้าผลึกเพื่อดูแสงทะลุผ่านในทุกหน้าผลึก บันทึกผล



รูปที่ 3.1 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์ในการสร้างเกรตติงภายในผลึก Fe:LiNbO<sub>3</sub>



รูปที่ 3.2 การติดตั้งอุปกรณ์ในการสร้างเกรตติงภายในผลึก Fe:LiNbO<sub>3</sub>

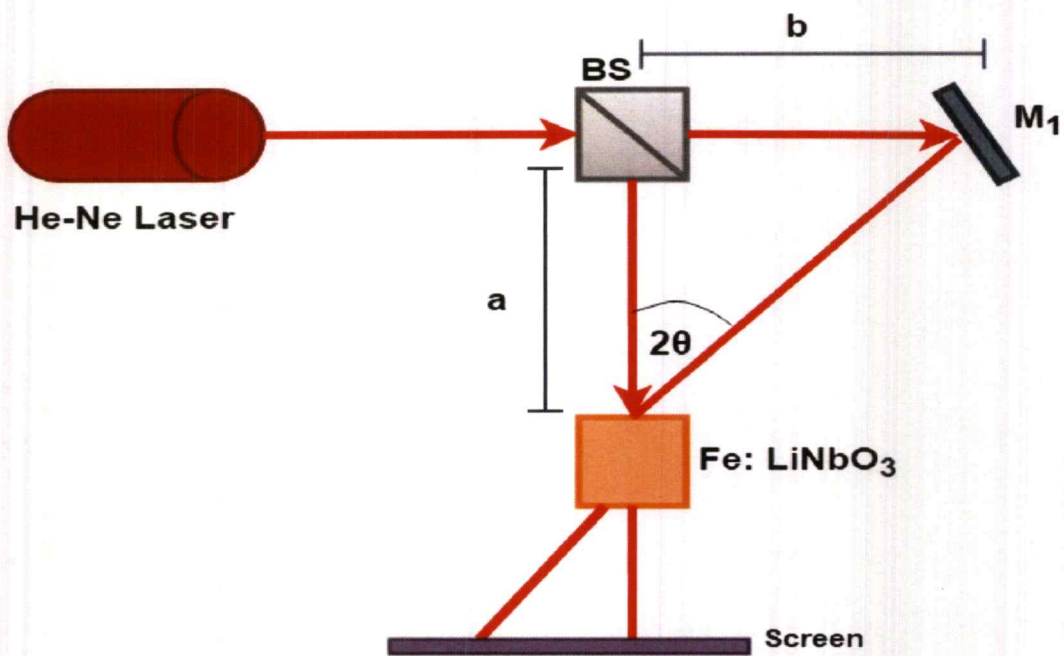
ตอนที่ 3.1.2 การทดลองเพื่อศึกษาหามุมตกกระทบของลำแสงแทรกสอดในการสร้างเกรตติงจากปรากฏการณ์ Photorefractive effect

อุปกรณ์การทดลอง

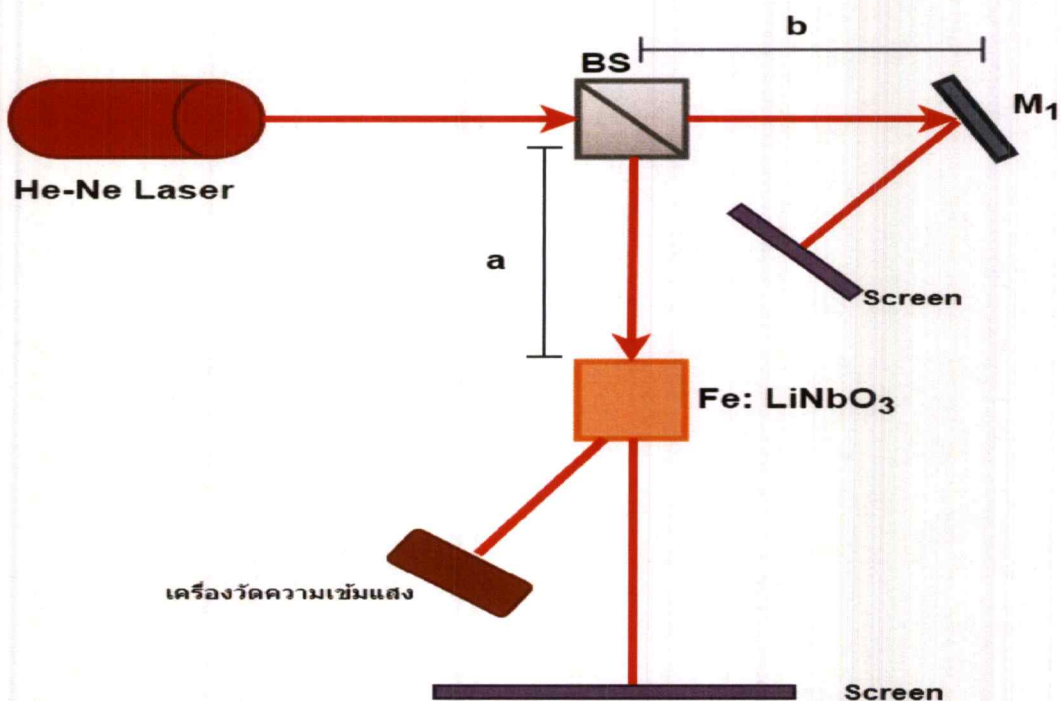
1. เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน (He-Ne Laser) ความยาวคลื่น 632.8 nm. 12 mW
2. ผลึก Fe: LiNbO<sub>3</sub>
3. Beam splitter อัตราส่วน 50:50
4. กระจก
5. แท่นวางผลึก
6. เครื่องวัดความเข้มแสง
7. ฉากรับแสง

วิธีการทดลอง

8. จัดเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนให้แนวลำแสงขนานกันตลอดระนาบ
9. นำ Beam Splitter มาวางไว้หน้าระนาบลำแสงเลเซอร์เพื่อให้ทำให้แสงเลเซอร์แยกออกเป็นสองลำแสง
10. นำกระจกมาวางเพื่อให้สะท้อนลำแสงที่แยกออกมา ให้สะท้อนกับไปรวมกับลำแสงอีกลำ
11. นำผลึก Fe: LiNbO<sub>3</sub> วางบนแท่นหน้าลำแสงฉายผ่าน จัดลำแสงทั้งสองลำที่ผ่านผลึกให้เกิดการแทรกสอดกัน
12. เปลี่ยนระยะห่าง (a) ระหว่างหน้า Beam Splitter กับหน้าผลึก Fe :LiNbO<sub>3</sub> ให้มุมที่แสงเลเซอร์มีการเปลี่ยนแปลง เพื่อหามุมตกกระทบที่เหมาะสมในการทำให้เกิดแสงทะลุผ่านมากที่สุด ที่ระยะจาก Beam Splitter ถึงกระจก (b) มีค่าเท่ากับ 14 เซนติเมตรตลอดการทดลอง
13. โดยกำหนดเวลาฉายแสงหน้าผลึกนาน 10 นาทีและ 20 นาที บันทึกผล
14. ปิดลำแสงหน้ากระจก แล้วใช้เครื่องวัดความเข้มแสง วัดค่าความเข้มแสงที่ทะลุผ่าน บันทึกผล



รูปที่ 3.3 แผนภาพการทดลองหามุมตกกระทบของลำแสงแทรกสอดในการสร้างเกรตติงจากปรากฏการณ์ Photorefractive effect



รูปที่ 3.4 แผนภาพการทดลองวัดความเข้มแสงของแสงทะลุผ่าน (Beam Transfer) จากเกรตติงที่เกิดจากปรากฏการณ์ Photorefractive effect

### ตอนที่ 3.2 การทดลองเพื่อศึกษาวิธีการส่งผ่านความเข้มแสงโดยการจัดการทดลองแบบทะลุผ่านในระบบ 4f

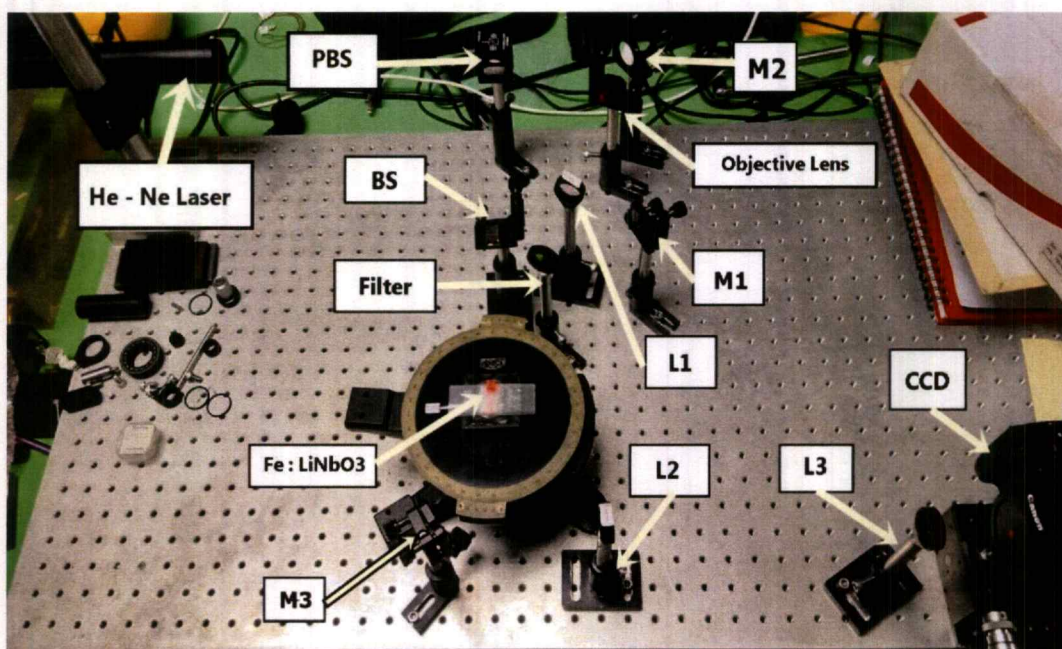
#### อุปกรณ์ในการทดลอง

1. เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน He-Ne 633 นาโนเมตร 12 มิลลิวัตต์
2. Polarized Beam Splitter อัตราส่วน 50:50
3. Beam Splitter อัตราส่วน 50:50
4. กระจกสะท้อน
5. Objective lens
6. เลนส์นูนความโฟกัส 150 มิลลิเมตร และความยาวโฟกัส 100 มิลลิเมตร
7. ผลึก  $\text{Fe:LiNbO}_3$
8. ฐานวางผลึก
9. Filter
10. กล้อง CCD

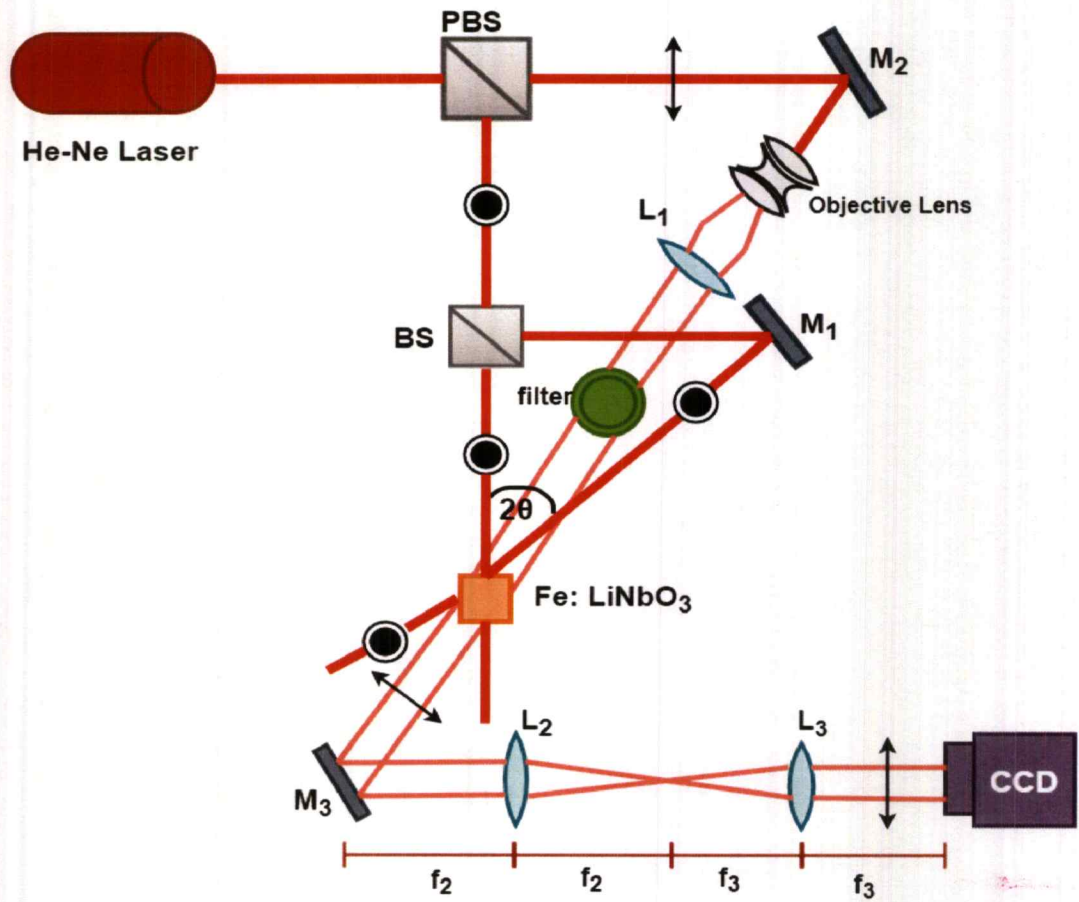
#### วิธีการทดลอง

1. จัดวางเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนให้ลำแสงเลเซอร์ที่ทิศทางขนานกับโต๊ะ ใช้ฉากรับแสงตรวจวัดลำแสงในตำแหน่งใกล้และไกลว่าลำแสงอยู่ในตำแหน่งเดิมเสมอ
2. นำ Polarize Beam Splitter อัตราส่วน 50:50 มาแยกลำแสงเป็น 2 ลำแสง
3. ในลำแสงแรกเป็นแสงโพลาไรซ์แกนหนึ่งจะจัดการติดตั้งอุปกรณ์ในการสร้างเกรตติงภายในผลึก  $\text{Fe:LiNbO}_3$  ดังแสดงในการทดลองตอนที่ 1
4. ในลำแสงที่สองเป็นลำแสงโพลาไรซ์แกนตั้งฉากกับลำแสงโพลาไรซ์ที่สร้างเกรตติง นำกระจกสะท้อนมาวางในตำแหน่งที่ลำแสงเลเซอร์ทะลุผ่านหน้าผลึก
5. นำ Objective Lens มาวางหน้าแสงเลเซอร์เพื่อขยายลำแสงให้ลำแสงมีความเข้มแสงสม่ำเสมอ
6. นำเลนส์นูน  $L_1$  ในระยะความยาวโฟกัสของเลนส์นูน  $L_1$  มาวางหน้า Objective Lens เพื่อให้ลำแสงขนาน
7. นำ Filter มาวางเพื่อกรองความเข้มแสง
8. นำกระจกสะท้อนมาวางหลังลำแสงที่ทะลุผ่านผลึกไปทิศทางแนวระนาบเพราะพื้นที่โต๊ะทดลองไม่มีเพียงพอ
9. นำเลนส์นูน  $L_2$  วาง โดยระยะห่างกระจกกับเลนส์นูน  $L_2$  เท่ากับระยะความยาวโฟกัสของเลนส์นูน  $L_2$
10. จากนั้นวางเลนส์นูน  $L_3$  ที่ระยะห่างจากเลนส์นูน  $L_2$  เป็นระยะเท่ากับความยาวโฟกัสเลนส์นูน  $L_2+L_3$  เพื่อให้ลำขนานเกิดภาพ

11. นำกล้อง CCD มาบันทึกภาพ โดยวางกล้องห่างจากเลนส์นูน  $L_3$  เป็นระยะเท่ากับระยะความยาวโฟกัสของเลนส์นูน  $L_3$
12. บันทึกภาพที่ตำแหน่งโฟกัส (Focus) และเลื่อนกล้อง CCD ไปที่ตำแหน่งจุดเบลอ (Defocus) ในแนวระนาบแกน z ก่อนและหลังระนาบและบันทึกผล
13. นำภาพที่บันทึกไปประมวลผลในโปรแกรมที่ใช้หลักการของสมการการส่งผ่านความเข้มแสง (TIE)

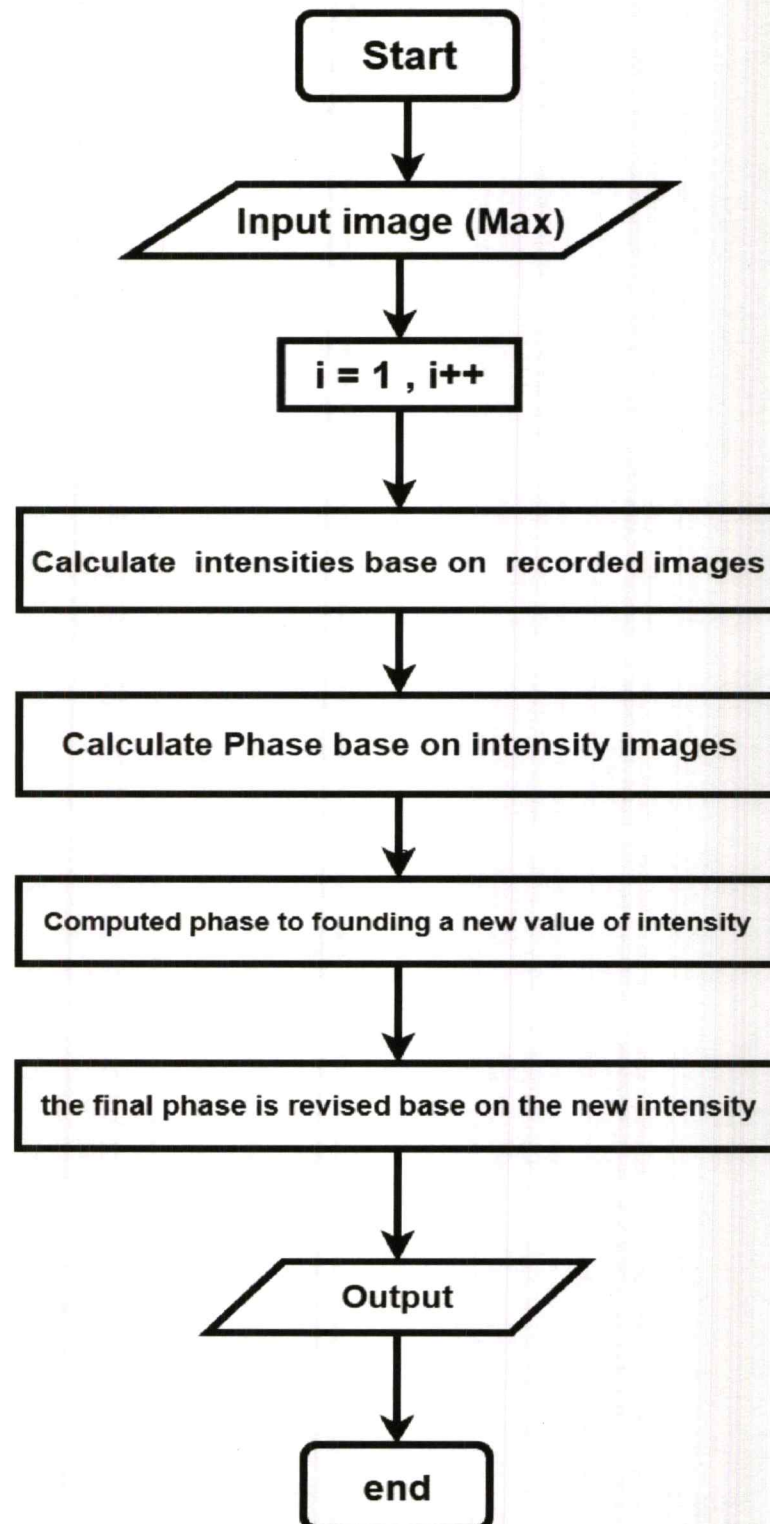


รูปที่ 3.5 การติดตั้งอุปกรณ์ศึกษาวิธีการส่งผ่านความเข้มแสงโดยการจัดการทดลองแบบทะลุผ่านในระบบ 4f เพื่อดูการสร้างเกรตติงภายในผลึก Fe:LiNbO<sub>3</sub>

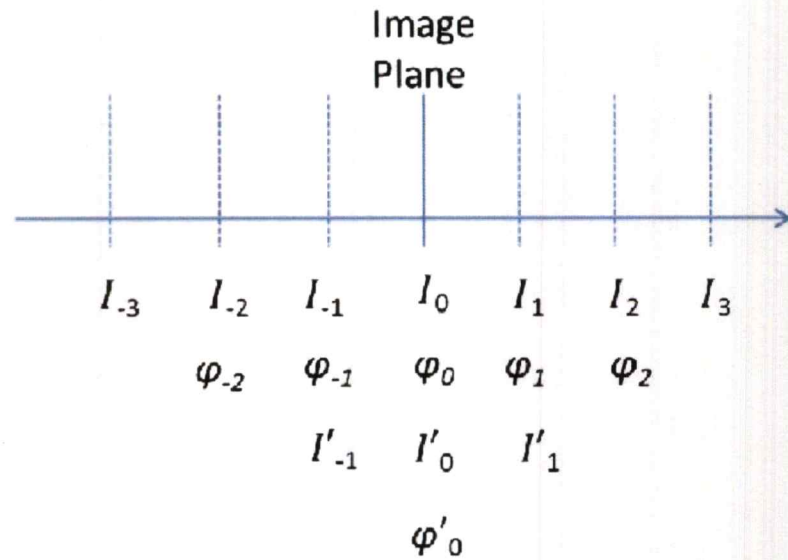


รูปที่ 3.6 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์ศึกษาวิธีการส่งผ่านความเข้มแสงโดยการจัดการทดลองแบบ  
ทะลุผ่านในระบบ 4f เพื่อการสร้างเกรตติงภายในผลึก Fe:LiNbO<sub>3</sub>

14. การใช้โปรแกรมสำหรับการประมวลผลภาพและสร้างภาพด้วยหลักการสมการวิธีการส่งผ่านความเข้มแสง (TIE) โดยวิธีการทำงานสามารถเขียนเป็นไดอะแกรมได้ ดังนี้



รูปที่ 3.7 ไดอะแกรมแสดงการทำงานของกระบวนการประมวลผลภาพด้วยวิธีการ TIE



รูปที่ 3.8 แผนภาพการคำนวณหาความเข้มแสงและเฟสของเกรตติง

ในแผนภาพการคำนวณหาเฟสและความเข้มแสงแสดงในรูปที่ 3.4 เมื่อบันทึกความเข้มแสงด้วยกล้อง CCD ในระนาบโฟกัสที่แตกต่างกัน 7 ตำแหน่ง จาก  $I_{-3}$  ถึง  $I_{-1}$  ซึ่งได้จากการเลื่อนกล้องจากขวาไปซ้ายโดยเลื่อนทีละระยะที่ละ 500 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นระยะที่น้อยกว่าระยะเรย์ลีห์ (Rayleigh length) ที่เฟส  $\varphi_{-2}(I_{-3}, I_{-1})$  จะถูกคำนวณจากการบันทึกภาพความเข้มแสงตำแหน่ง  $I_{-3}$  และ  $I_{-1}$  ด้วยวิธีการของ TIE ในเฟส  $\varphi_{-1}(I_{-2}, I_0)$ ,  $\varphi_0(I_{-1}, I_1)$ ,  $\varphi_1(I_0, I_2)$  และ  $\varphi_2(I_1, I_3)$  จะถูกคำนวณด้วยวิธีการเดียวกัน หลังจากนั้นจะคำนวณหาค่าความเข้มแสงค่าใหม่  $I'_{-1}$  จากเฟส  $\varphi_{-2}(I_{-3}, I_{-1})$  และ  $\varphi_0(I_{-1}, I_1)$  และการคำนวณประมวลผลค่าความเข้มแสงอื่นก็จะถูกคำนวณเช่นเดียวกัน แล้วนำค่าความเข้มแสงใหม่ที่ได้มาคำนวณเฟสสุดท้าย  $\varphi'_0(I'_{-1}, I'_1)$  ในการดูลักษณะเกรตติงที่เกิดขึ้น

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองในการศึกษาวิธีการส่งผ่านความเข้มแสงสำหรับตรวจสอบลักษณะเกรตติงของ Fe:LiNbO<sub>3</sub> โดยผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ ผลการทดลองที่ 4.1 การศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ Photorefractive effect ในผลึก Fe:LiNbO<sub>3</sub> และผลการทดลองการศึกษาวิธีการส่งผ่านความเข้มแสงโดยการจัดการทดลองแบบทะลุผ่านในระบบ 4f เพื่อดูการสร้างเกรตติงภายในผลึก Fe:LiNbO<sub>3</sub>

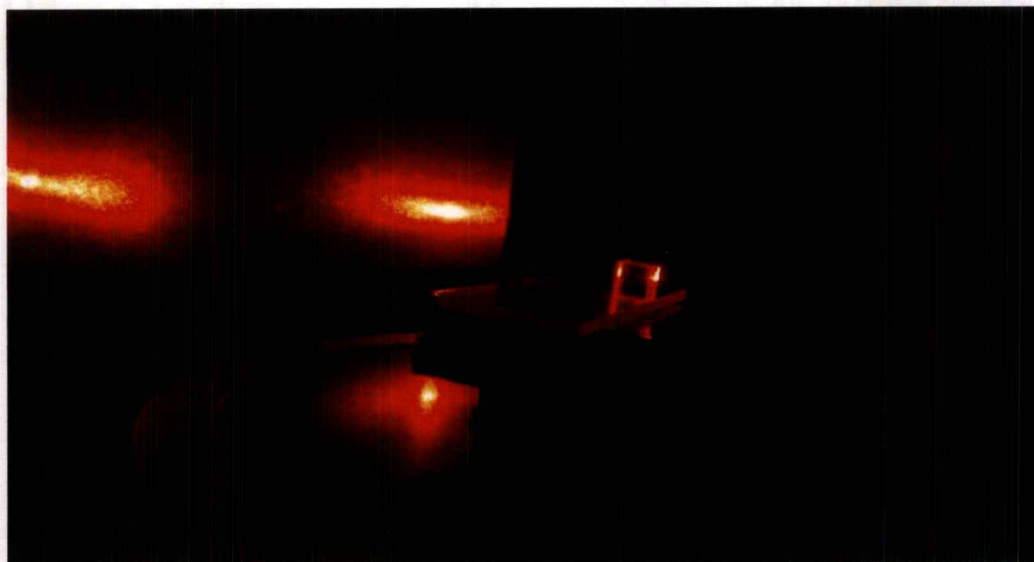
#### 4.1 ผลการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ Photorefractive effect ในผลึก LiNbO<sub>3</sub>

ผลการทดลองในตอนต้นที่ 4.1 เมื่อฉายลำแสงเลเซอร์ 2 ลำให้เกิดการแทรกสอดกันที่บริเวณผิวหน้าผลึก Fe:LiNbO<sub>3</sub> เกิดการแพร่ของประจุลบประจุบวกวิ่งเข้าหากันเป็นแบบคาบตามแถบการแทรกสอดของลำแสง ทำให้บริเวณสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าดัชนีหักเหแสงในผลึกที่แตกต่างกัน จึงเกิดเป็นลักษณะเกรตติงแบบแบรกก์ แล้วจึงทำให้ลำแสงสามารถเลี้ยวเบนผ่านเกรตติงออกตามแนวลำแสงตกกระทบออกมา ซึ่งแสงที่เลี้ยวเบนออกมา เรียกว่าการเลี้ยวเบนด้วยตัวเอง (Self-diffraction)

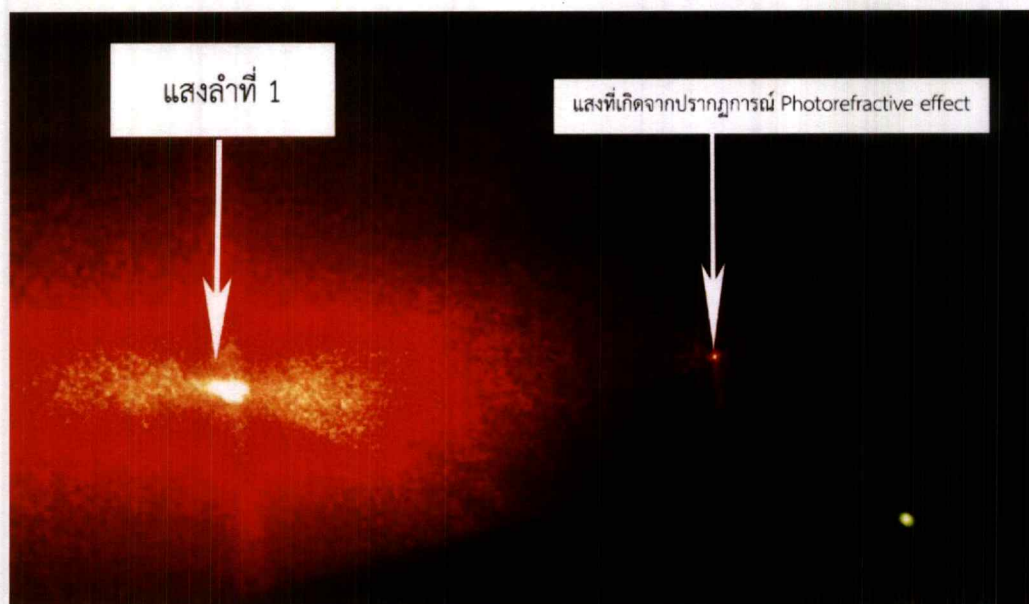
##### 4.1.1 ผลการทดลองเพื่อหาด้านของผลึก Fe: LiNbO<sub>3</sub> ที่เกิดปรากฏการณ์

##### Photorefractive effect

ผลการทดลองในตอนต้นที่ 4.1.1 นี้ได้ดำเนินการทดลองหาหน้าของด้านผลึก Fe: LiNbO<sub>3</sub> ทั้งหมด 6 หน้าผลึก เพื่อหาด้านผลึกที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ Photorefractive effect เพื่อนำไปใช้ในการทดลองที่ 4.1.2 โดยในการทดลองตอนต้นที่ 4.1.1 จะวางผลึก LiNbO<sub>3</sub> แล้วจัดลำแสงเลเซอร์ให้เกิดการแทรกสอดกันในผิวหน้าผลึกแล้วดูการเกิดปรากฏการณ์ Photorefractive effect โดนปิดกั้นลำแสงหนึ่งลำหน้ากระจก ถ้าหากด้านผลึก LiNbO<sub>3</sub> ที่เป็นตัวกำหนดการเกิดเกรตติงภายในผลึก เมื่อปิดลำแสงหน้ากระจก แสงที่ทะลุผ่าน (Beam Transfer) จะเห็นเป็นสองลำแสงเช่นเดิม เหมือนกับตอนที่ฉายลำแสงสองลำเข้าผิวหน้าผลึกในตอนแรก จากการทดลองดูแสงทะลุผ่านจากผลึกทั้งหมด 6 หน้า พบว่าผลึกมีหนึ่งด้านที่ทำให้เกิดเกรตติงจากปรากฏการณ์ Photorefractive ได้ดีที่สุดและจะถูกนำไปใช้ในการทดลองที่ 4.1.2 ต่อไป



รูปที่ 4.1 ด้านผลึก Fe: LiNbO<sub>3</sub> ที่เกิดเกรตติงจากปรากฏการณ์ Photorefractive effect



รูปที่ 4.2 การเกิดปรากฏการณ์ Photorefractive effect

#### 4.1.2 การทดลองเพื่อศึกษาหามุมตกกระทบของลำแสงแทรกสอดในการสร้างเกรตติงจากปรากฏการณ์ Photorefractive effect

ในการทดลองตอนที่ 4.1.2 นี้ได้ดำเนินการทดลองหามุมตกกระทบของลำแสงเลเซอร์ในการแทรกสอดที่ทำให้เกิดเกรตติงจากปรากฏการณ์ Photorefractive effect ในผลึก โดยวัดความเข้มแสงจากแสงทะลุผ่าน (Beam Transfer) มากที่สุด โดยจะสร้างมุมตกกระทบกำหนดมุมอ้างอิงจากทฤษฎีพีทาโกรัส (Pythagorus) ซึ่งจะกำหนดระยะ beam splitter ถึงหน้าผลึก  $\text{Fe:LiNbO}_3$  เท่ากับระยะ a และระยะจาก beam splitter ถึงหน้ากระจก เท่ากับระยะ b และจะเลื่อนตำแหน่งของฐานวางผลึกไปตามระยะทางที่กำหนด และให้ระยะ b มีค่าเท่าเดิมตลอดการทดลอง เพื่อให้ได้มุมตกกระทบตามต้องการ และกำหนดระยะเวลาในการสร้างเกรตติงเป็น 10 นาที และ 20 นาที แล้ววัดความเข้มแสงของแสงที่ทะลุผ่าน (beam transfer) ออกมา ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความเข้มแสงที่ทะลุผ่านในมุมตกกระทบที่กำหนด

ระยะ ตำแหน่ง a (cm)	ระยะ ตำแหน่ง b (cm)	มุมตก กระทบ ( $2\theta$ ) (องศา)	ความเข้มแสงที่ทะลุผ่าน	
			10 นาที	20 นาที
			แสงทะลุผ่านลำที่ 2 (nW)	แสงทะลุผ่านลำที่ 2 (nW)
13.0	14.0	47.12	15.02	10.78
13.5	14.0	46.04	9.80	8.56
14.0	14.0	45.00	9.52	7.33
14.5	14.0	44.00	5.21	4.95
<b>15.0</b>	<b>14.0</b>	<b>43.03</b>	5.36	<b>78.70</b>
15.5	14.0	42.09	9.64	9.15
16.0	14.0	41.19	8.13	7.50
16.5	14.0	40.31	7.14	22.29
17.0	14.0	39.47	11.71	8.96
17.5	14.0	38.66	3.33	17.04

จากตารางที่ 4.1 ความเข้มแสงที่ทะลุผ่านในมุมตกกระทบที่กำหนด แสดงให้เห็นว่า มุมที่ ( $2\theta$ ) เท่ากับ 43.03 องศา ที่เกิดจากการกำหนดระยะ a เท่ากับ 15 เซนติเมตร และระยะ b เท่ากับ

14 เซนติเมตร และใช้ระยะเวลาสร้างเกรตติง 20 นาที แล้วเมื่อวัดค่าความเข้มแสงจากแสงที่ทะลุผ่าน (beam transfer) มีค่ามากที่สุด ดังนั้นมมนี้จึงเป็นมุมตกกระทบที่ทำให้ลำแสงเลเซอร์ 2 ลำแสงเกิดการแทรกสอดแล้วเกิดเกรตติงจากปรากฏการณ์ Photorefractive effect ได้ดี แล้วนำมุมตกกระทบนี้ไปทดลองต่อในตอนี่ 4.2



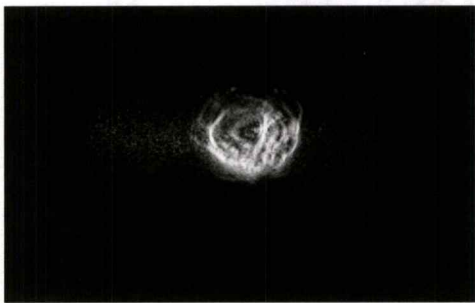
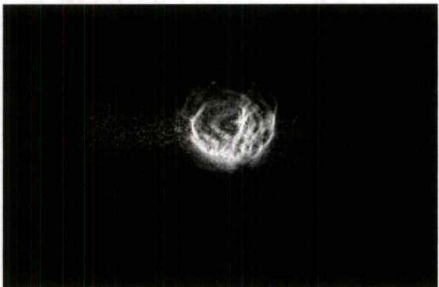

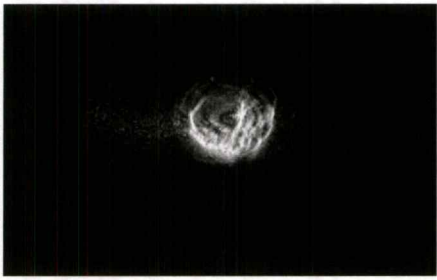

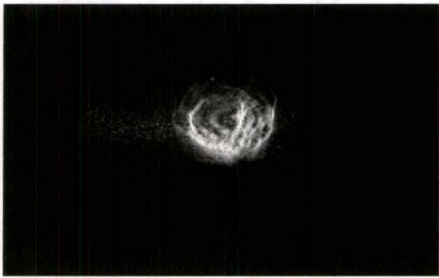

รูปที่ 4.3 ลำแสงทะลุผ่าน (beam transfer) จากปรากฏการณ์ Photorefractive effect ในมุมสร้างเกรตติงเท่ากับ 43.03 องศา

#### 4.2 ผลการทดลองการศึกษาวិธีการส่งผ่านความเข้มแสงโดยการจัดการทดลองแบบทะลุผ่านในระบบ 4f เพื่อการสร้างเกรตติงภายในผลึก Fe: LiNbO<sub>3</sub>

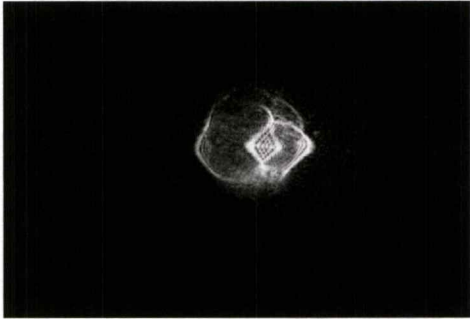
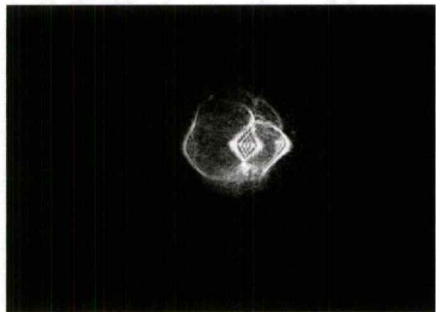
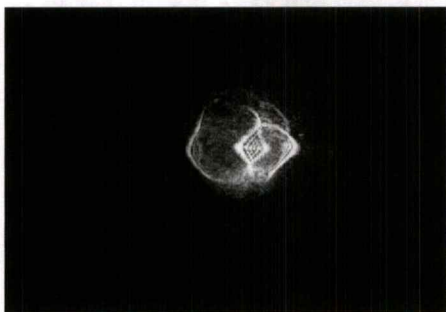
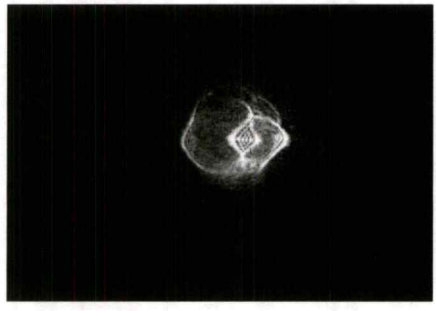
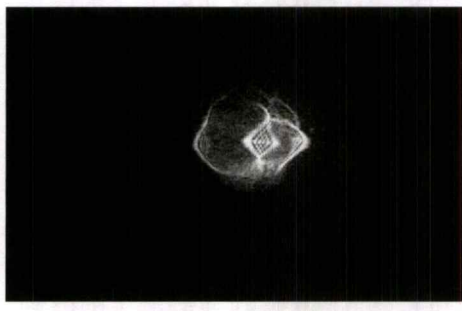
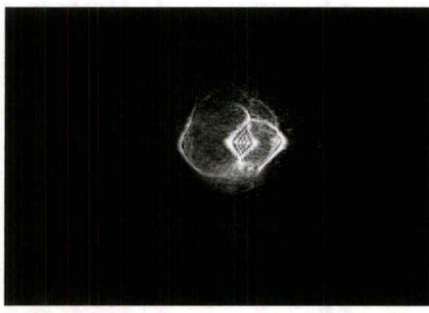
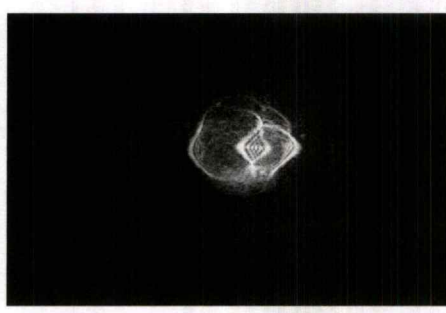
ในการทดลองตอนที่ 4.2 นี้ได้ดำเนินการทดลองศึกษาวิธีการส่งผ่านความเข้มแสงในการตรวจวัดการสร้างเกรตติงจากปรากฏการณ์ Photorefractive effect ในผลึก Fe : LiNbO<sub>3</sub> โดยใช้ฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ (He-Ne Laser) ที่มีความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำแสง 0.86 มิลลิเมตร เมื่อลำแสงเลเซอร์ขนานอยู่ในระยะความสูงเดิมตลอดแนว จากนั้นนำ polarized beam splitter มาวางหน้าเลเซอร์เพื่อแยกลำแสงเป็น 2 ลำแสง โดยให้ลำแสงเลเซอร์โพลาไรซ์แกนหนึ่งเป็นลำแสงที่ใช้สร้างเกรตติงจากปรากฏการณ์ Photorefractive effect ในผลึก Fe : LiNbO<sub>3</sub> และลำแสงโพลาไรซ์แกนตั้งฉากกับลำแสงโพลาไรซ์ที่สร้างเกรตติงเป็นลำแสงที่ใช้ในการตรวจวัดเกรตติงด้วยวิธีการส่งผ่านความเข้มแสง ในการสร้างเกรตติงจะแยกลำแสงโพลาไรซ์แกนตั้งด้วย beam splitter เป็น 2 ลำแสง ลำแสงที่ 1 จะยิงตรงมาที่ผิวหน้าผลึก โดยกำหนดเป็นระยะ a เท่ากับ 15 เซนติเมตร ลำแสงที่ 2 ถูกกำหนดระยะจสก beam splitter ถึงหน้ากระจกเท่ากับ 14 เซนติเมตร แล้วลำแสงจะ

ถูกสะท้อนมาเข้าที่หน้าผลึกทำมุม 43.03 องศา ในการสร้างเกรตติง และในการตรวจวัดเกรตติง ด้วยวิธีการส่งผ่านความเข้มแสงจะมีวิธีการจัดตั้งอุปกรณ์โดยใช้ลำแสงเลเซอร์โพลาไรซ์แกนนอนในการตรวจวัด โดยจะใช้กระจก  $M_2$  สะท้อนลำแสงไปในแนวทิศทางแนวของหน้าผลึก แล้วนำ objective lens มาขยายลำแสงเลเซอร์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อให้ได้ความเข้มแสงที่มีความสม่ำเสมอ และได้ลำแสงที่ครอบคลุมทั้งหน้าผลึกที่ใช้ในการบันทึกภาพ จากนั้นวางเลนส์นูน  $L_1$  ที่มีระยะความยาวโฟกัส 100 มิลลิเมตร เพื่อให้ลำแสงขนานตลอดระยะนาบ นำ filter มาวางเพื่อลดความเข้มแสงเพื่อให้สะท้อนไปในแนวระนาบเดิม เนื่องจากพื้นที่ในการทดลองไม่เพียงพอ แล้ววางเลนส์  $L_2$  ที่มีระยะความยาวโฟกัส 150 มิลลิเมตร วางหน้ากระจก 15 เซนติเมตร เพื่อรวมแสง ตรงจุดโฟกัสได้ภาพขนาดเล็กมาก จึงนำเลนส์นูน  $L_3$  ระยะความยาวโฟกัส 100 มิลลิเมตร ห่างจากเลนส์นูน  $L_2$  เป็นระยะ 25 เซนติเมตร เพื่อให้ได้ลำแสงมีขนาดเดิม นำกล้อง CCD มาวางที่ตำแหน่งจุดโฟกัสของเลนส์  $L_3$  จากนั้นบันทึกที่ความเข้มแสง  $I_2$  ที่จุดโฟกัส แล้วเลื่อนกล้อง CCD ไปตำแหน่งจุดเบลอ (defocus) แกนระนาบก่อนจุดโฟกัส ( $-\Delta z$ ) บันทึกภาพได้ภาพที่มีความเข้มแสง  $I_{(-\Delta z)}$  และเลื่อนกล้องไปแกนระนาบหลังจุดโฟกัส ( $+\Delta z$ ) บันทึกภาพจะได้ภาพที่มีความเข้มแสง  $I_{(+\Delta z)}$  ซึ่งระยะ defocus ที่กล้องเลื่อนไป จะอยู่ในช่วง Rayleigh length ( $Z_R$ ) คือ 1,744.3858 มิลลิเมตร โดยการทดลองนี้ได้เก็บผลการทดลองเป็นจำนวน 3 ครั้ง โดยจะถ่ายภาพที่ตำแหน่งโฟกัส (focus) และตำแหน่งจุดเบลอ (defocus) ที่ระยะ 500, 1500 และ 2500 ไมโครเมตร โดยที่เลือกระยะ defocus 3 ระยะนี้ เพราะ ภาพที่ได้ในตำแหน่งนี้เริ่มมีความแตกต่างจากตำแหน่ง focus และภาพจากการบันทึกครั้งที่ 3 ได้ภาพที่ชัดเจน และมี noise น้อยกว่ารูปภาพที่บันทึกทั้ง 2 ครั้งแรก จึงได้เลือกภาพจากการทดลองที่ 3 เพื่อนำไปคำนวณเฟสโดยใช้เทคนิค TIE

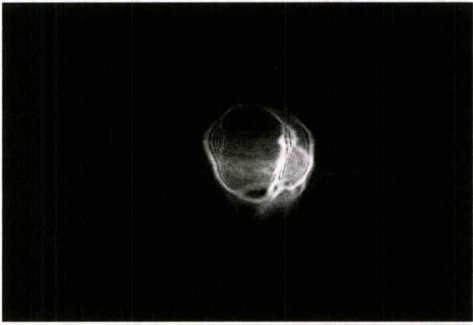
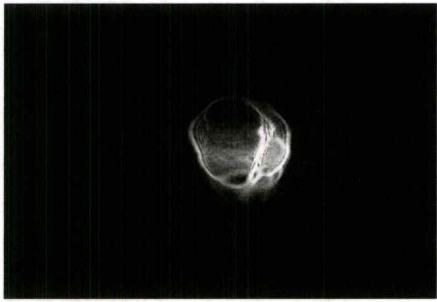
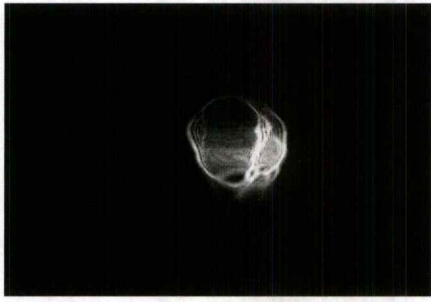

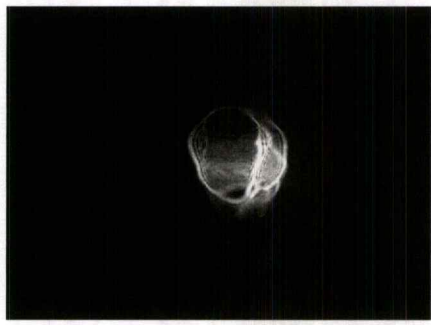

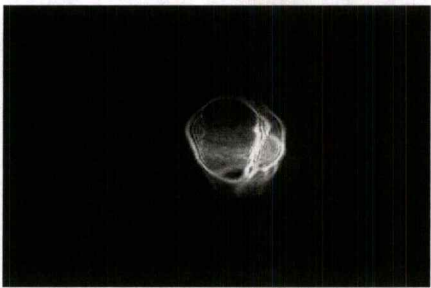
ตารางที่ 4.2 แสดงภาพที่บันทึกครั้งที่ 1 ในระยะ focus และ defocus ของเกรตติงที่เกิดจากปรากฏการณ์ Photorefractive effect ในผลึก Fe : LiNbO<sub>3</sub>

ระยะ focus		
focus		
ระยะ defocus		
$\Delta Z$	$-\Delta Z$ ( $\mu\text{m}$ )	$+\Delta Z$ ( $\mu\text{m}$ )
500		
1500		
2500		

ตารางที่ 4.3 แสดงภาพที่บันทึกครั้งที่ 2 ในระยะ focus และ defocus ของเกรตติงที่เกิดจากปรากฏการณ์ Photorefractive effect ในผลึก Fe : LiNbO<sub>3</sub>

ระยะ focus		
focus		
ระยะ defocus		
$\Delta Z$	$-\Delta Z$ ( $\mu\text{m}$ )	$+\Delta Z$ ( $\mu\text{m}$ )
500		
1500		
2500		

ตารางที่ 4.4 แสดงภาพที่บันทึกครั้งที่ 3 ในระยะ focus และ defocus ของเกรตติงที่เกิดจากปรากฏการณ์ Photorefractive effect ในผลึก Fe : LiNbO<sub>3</sub>

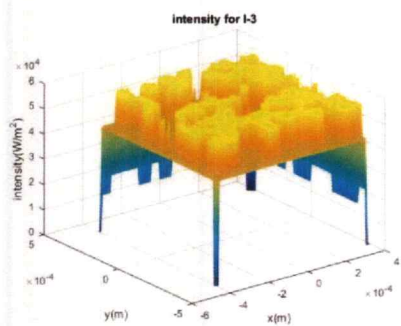
ระยะ focus		
focus		
ระยะ defocus		
$\Delta Z$	$-\Delta Z$ ( $\mu\text{m}$ )	$+\Delta Z$ ( $\mu\text{m}$ )
500		
1500		
2500		

จากการเก็บข้อมูลบันทึกรูปภาพการเกิดเกรตติงจากปรากฏการณ์ Photorefractive effect ทั้ง 3 ครั้ง จึงได้เลือกรูปภาพที่บันทึกครั้งที่ 3 ไปประมวลผลเฟสด้วยวิธีการของ TIE ในโปรแกรม คอมพิวเตอร์

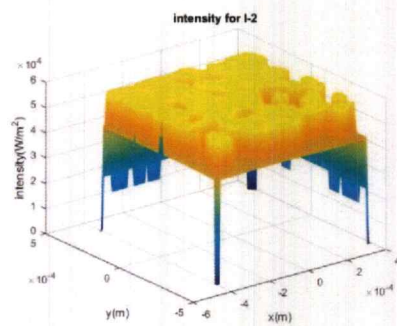
ในการการใช้โปรแกรมสำหรับการประมวลผลภาพและสร้างภาพด้วยหลักการสมการวิธีการ ส่งผ่านความเข้มแสง (TIE) เมื่อบันทึกความเข้มแสงด้วยกล้อง CCD ในระนาบโฟกัสที่แตกต่างกัน 7 ตำแหน่งจาก  $I_{-3}$  ถึง  $I_{-1}$  ซึ่งได้จากการเลื่อนกล้องจากขวาไปซ้ายโดยเลื่อนที่ระยะทีละ 500 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นระยะที่น้อยกว่าระยะเรย์ลีห์ (Rayleigh length) ที่เฟส  $\varphi_{-2}(I_{-3}, I_{-1})$  จะถูก คำนวณจากการบันทึกภาพความเข้มแสงตำแหน่ง  $I_{-3}$  และ  $I_{-1}$  ด้วยวิธีการของ TIE ในเฟส  $\varphi_{-1}(I_{-2}, I_0)$ ,  $\varphi_0(I_{-1}, I_1)$ ,  $\varphi_1(I_0, I_2)$  และ  $\varphi_2(I_1, I_3)$  จะถูกคำนวณด้วยวิธีการเดียวกัน หลังจากนั้นจะคำนวณหาค่าความเข้มแสงค่าใหม่  $I'_{-1}$  จากเฟส  $\varphi_{-2}(I_{-3}, I_{-1})$  และ  $\varphi_0(I_{-1}, I_1)$  และการคำนวณประมวลผลค่าความเข้มแสงอื่นก็จะถูกคำนวณเช่นเดียวกัน แล้วนำค่าความเข้มแสง ใหม่ที่ได้มาคำนวณเฟสสุดท้าย  $\varphi'_0(I'_{-1}, I'_1)$  ในการดูลักษณะเกรตติงที่เกิดขึ้น

จากผลการคำนวณเฟสในโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้หลักการ TIE ยังไม่สามารถที่จะ คำนวณหาลักษณะของเกรตติงได้เนื่องจากการกำหนดขอบเขตเงื่อนไขความเข้มแสงในชุดคำสั่งไม่ ถูกต้อง ยังคงต้องแก้ไข พัฒนาชุดคำสั่งเพื่อให้ประมวลผลได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องต่อไปในอนาคต

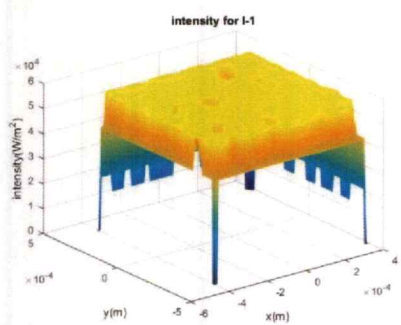
โดยผลการประมวลผลภาพทั้งหมดจะแสดงให้เห็น ดังนี้



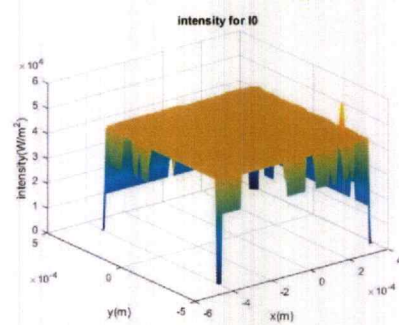
(1)



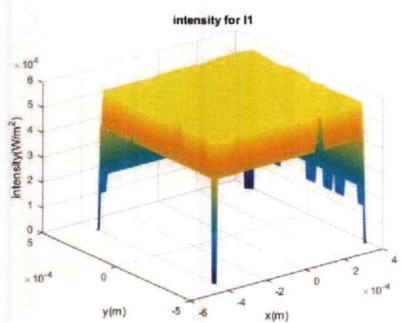
(2)



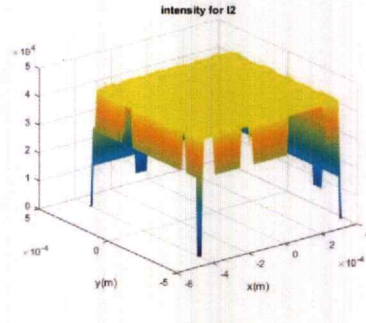
(3)



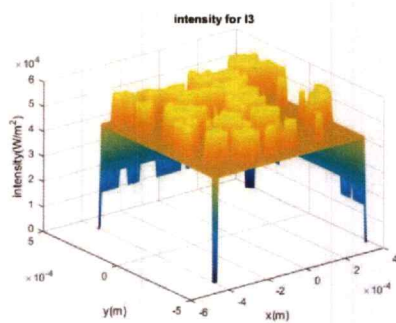
(4)



(5)

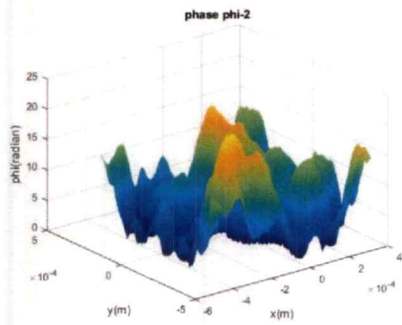


(6)

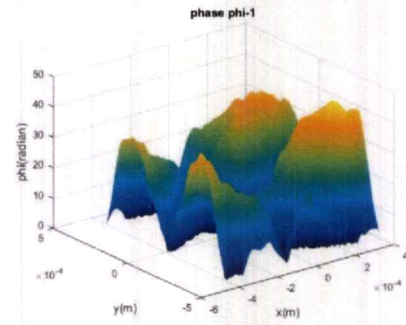


(7)

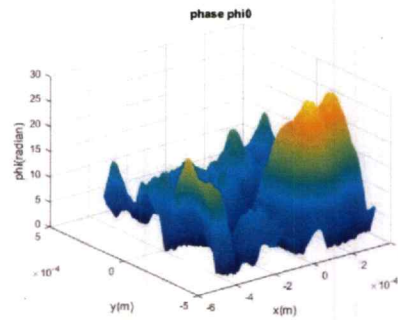
รูปที่ 4.4 รูปที่ (1) - (7) แสดงกราฟ 3 มิติ ในการบันทึกภาพความเข้มแสง  $I_{-3}, I_{-2}, I_{-1}, I_0, I_1, I_2, I_3$  ตามลำดับในระนาบ 7 ตำแหน่งที่แตกต่างกัน



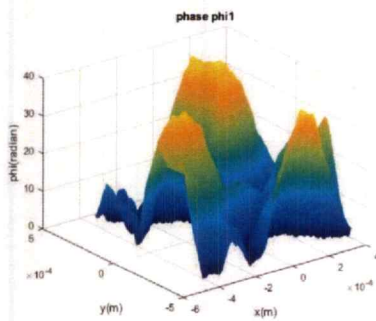
(1)



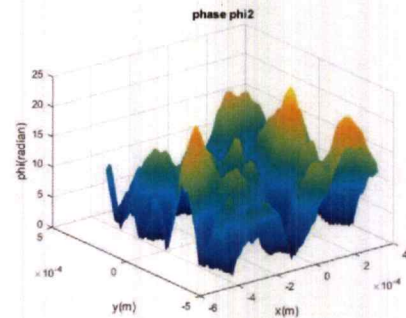
(2)



(3)

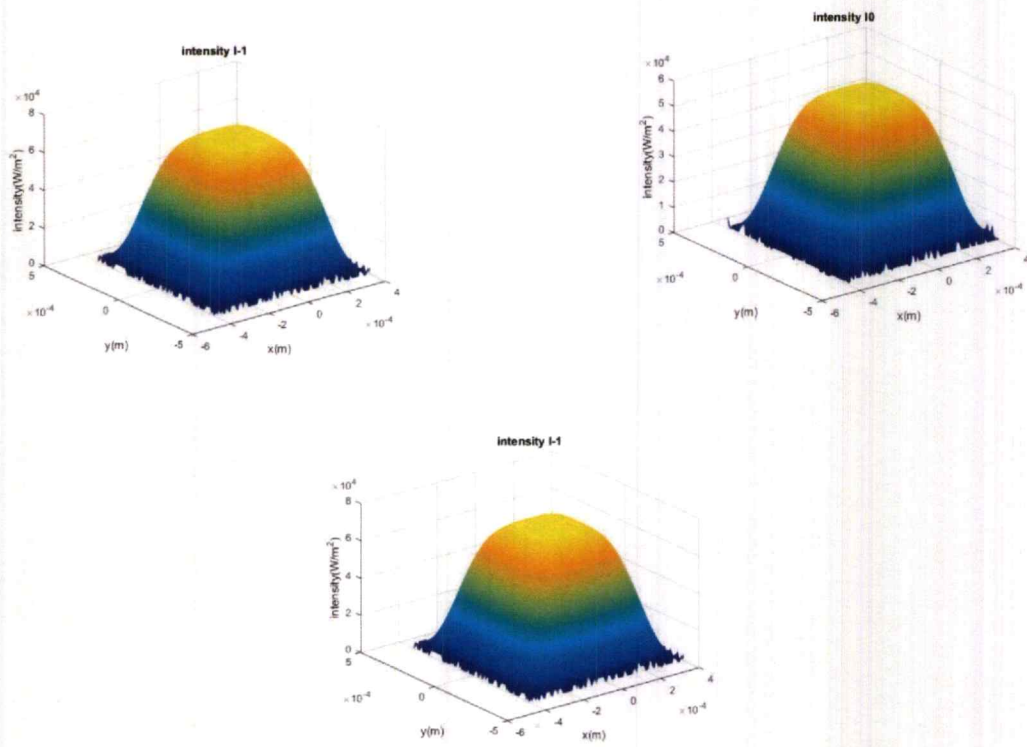


(4)

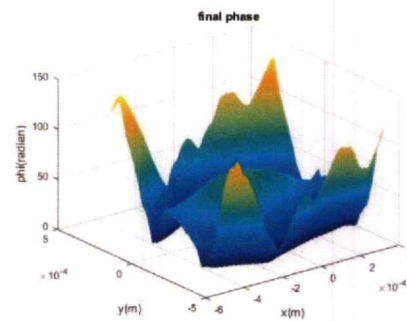


(5)

รูปที่ 4.5 รูปที่ (1) – (5) แสดงขนาดของเฟสที่คำนวณได้  $\varphi_{-2}$ ,  $\varphi_{-1}$ ,  $\varphi_0$ ,  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  ตามลำดับ โดยมาจากความเข้มแสง  $I_{-3}$ ,  $I_{-2}$ ,  $I_{-1}$ ,  $I_0$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  คำนวณด้วยวิธีการ TIE



รูปที่ 4.6 รูป (1) - (3) การคำนวณความเข้มแสงใหม่  $I'_{-1}, I'_0, I'_1$  ตามลำดับ โดยคำนวณมาจากเฟส  $\varphi_{-2}, \varphi_{-1}, \varphi_0, \varphi_1, \varphi_2$



รูปที่ 4.7 แสดงขนาดของเฟสสุดท้าย  $\varphi'_0$  ถูกแก้ไขด้วยการคำนวณความเข้มแสงใหม่จาก  $I'_{-1}, I'_0, I'_1$

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาวิธีการส่งผ่านความเข้มแสงสำหรับตรวจสอบลักษณะเกรตติงของผลึกโพโตรีแฟรกทีฟสรุปผลการทดลองได้ว่า ในการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ Photorefractive effect ในผลึก  $\text{Fe} : \text{LiNbO}_3$  จะมีอยู่หนึ่งด้านของผลึกที่จะทำให้เกิดเกรตติงจากปรากฏการณ์ Photorefractive effect ได้ดีและหามุมตกกระทบของลำแสงเลเซอร์สองลำแสงที่จะทำให้เกิดเกรตติงและมีลำแสงทะลุผ่าน (beam transfer) มากที่สุด คือมุมตกกระทบที่  $2\theta$  เท่ากับ  $43.03$  องศา ( $\theta = 21.52$  องศา)

ในการตรวจสอบลักษณะเกรตติงที่เกิดขึ้นภายในผลึก  $\text{Fe} : \text{LiNbO}_3$  นั้นจะใช้วิธีการส่งผ่านความเข้มแสงแบบทะลุผ่าน (Transmission) ในระบบ 4f โดยจะบันทึกภาพที่จุดโฟกัสของภาพและจุดเบลอ ( $\Delta Z$ ) ที่ระยะ 500, 1,500 และ 2,500 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นระยะที่น้อยกว่าระยะเรย์ลีห์ (Rayleigh length) มาก ซึ่งมีระยะเท่ากับ 1,744.3858 มิลลิเมตร นำภาพที่บันทึกได้ไปคำนวณหาเฟสลักษณะเกรตติงในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยหลักการของ TIE แต่ผลลัพธ์ยังไม่ประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ในการหาลักษณะเกรตติงได้

#### 5.2 ปัญหาในการวิจัยและข้อเสนอแนะ

1. ในการหามุมตกกระทบของลำแสงสองลำที่จะทำให้เกิดเกรตติงจากปรากฏการณ์ Photorefractive effect แบบแบรกก์ ยังไม่ใช่มุมแบรกก์ที่ดีที่สุดตามทฤษฎี ดังนั้นการวิจัยในอนาคตควรที่จะต้องหามุมตกกระทบที่ทำให้เกิดเกรตติงแบบแบรกก์ตามทฤษฎี
2. ในการประมวลผลเฟสลักษณะของเกรตติงผลลัพธ์สุดท้ายที่ได้ยังไม่เป็นไปตามวัตถุประสงค์ เนื่องจากการกำหนดขอบเขตเงื่อนไขของชุดคำสั่งยังไม่ถูกต้อง ในการกำหนดเงื่อนไขของความเข้มแสง จึงยังคงต้องพัฒนาหรือหาวิธีการแก้ไขชุดคำสั่งเพื่อให้สามารถคำนวณเฟสสุดท้ายออกมาได้อย่างถูกต้องในอนาคตต่อไปได้ โดยจากทฤษฎีการเกิดเกรตติงจากปรากฏการณ์ Photorefractive effect ในเงื่อนไขของแบรกก์ ในการใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร มุมที่ทำให้เกรตติง  $\theta$  เท่ากับ  $21.52$  องศา ขนาดของเกรตติง  $\Lambda$  ที่เกิดขึ้นภายในผลึก  $\text{Fe} : \text{LiNbO}_3$  มีค่าเท่ากับ  $0.8628$  ไมโครเมตร ตามสมการมุมของแบรกก์  $\sin\theta = \frac{\lambda}{2\Lambda}$  ซึ่งจะเป็นแนวทางในการแก้ไขพัฒนาชุดคำสั่งให้สามารถคำนวณหาเฟสเกรตติงที่เกิดขึ้นได้ตามค่าทฤษฎีที่กล่าวข้างต้นได้อย่างถูกต้องต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- ธรรม์ธัช ศรีสุวรรณ. 2562. “เทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงสำหรับตรวจสอบพฤติกรรมการกัดกร่อนพื้นผิวของโลหะผสม และเหล็กกล้าไร้สนิม.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- นิรนาม. 2555. CCD คืออะไร. [Online]. เข้าถึงได้จาก :  
<http://digital-camera-thailand.blogspot.com/2012/10/ccd.html>
- บัณฑิต เลิศศรีปรีชา และอมเรศ ศากยวงศ์. 2558. “คุณสมบัติโพโตรีแฟรกทีฟและการประยุกต์ใช้งานในผลึกลิเทียมไนโอเบต.” โครงการพิเศษปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์) ภาควิชาฟิสิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- Anonymous. 2018. Rayleigh length. [Online]. Available :  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh\\_length?fbclid=IwAR3jD6nQVu8K6SWGPDYwzhWP6LQ8qYhOv9RhP62mc7LZDJdaRrl85gLQpQM](https://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh_length?fbclid=IwAR3jD6nQVu8K6SWGPDYwzhWP6LQ8qYhOv9RhP62mc7LZDJdaRrl85gLQpQM)
- Anonymous. 2019. Lithium niobate. [Online]. Available :  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium\\_niobate](https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_niobate)
- Anonymous. n.d. Gaussian Beam Propagation. [Online]. Available :  
<https://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/lasers/gaussian-beam-propagation/>
- Gabriel Popescu. 2011. Quantitative Phase Imaging of Cells and Tissues. China : McGraw-Hill.
- Mahmudunnabi Basunia. 2016. “A Recursive Phase Retrieval Technique Using Transport of Intensity : Reconstruction of Imaged Phase and 3D Surfaces.” Ph.D. dissertation, University of Dayton.
- Pochi Yeh. 1993. Introduction to Photorefractive Nonlinear Optics. USA : John Wiley & Sons.
- Suwan Plaipichit. 2014. “Digital Holography for Nondestructive Testing.” Ph.D. Thesis of King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang.
- Thananthorn. 2561. รู้จักกับเลนส์นูนและเลนส์เว้า. [Online]. เข้าถึงได้จาก :  
<https://www.trueplookpanya.com/knowledge/content/70576/-blo-sciPHY-sci->