

การวิจัยขั้นต้นเกี่ยวกับผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในผลึกแบเรียม

ไททานเตชไนต์เจือด้วยอะตอมซีเรียม

MULTI HIGHER-ORDER ANISOTROPIC SELF-DIFFRACTION IN  
CERIUM DOPED BARIUM TITANATE CRYSTAL



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของภารกิจของมหาวิทยาลัยราชภัฏนครพนมในการพัฒนาคุณภาพชีวิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2555

KMITL-2012-SC-M-020-021

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเลี้ยวเบนอันดับสูงด้วยตัวเองแบบแอนไอโซทรอปิกในผลึกแบเรียม  
ไททานตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม

MULTI HIGHER-ORDER ANISOTROPIC SELF-DIFFRACTION IN  
CERIUM DOPED BARIUM TITANATE CRYSTAL



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน... 122992  
วัน,เดือน,ปี... 11 ต.ค. 2555

b. ๑๒๔๒๖๓๔  
i. ....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2555

KMITL-2012-SC-M-030-021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**MULTI HIGHER-ORDER ANISOTROPIC SELF-DIFFRACTION IN  
CERIUM DOPED BARIUM TITANATE CRYSTAL**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2012**

**KMITL-2012-SC-M-030-021**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2012**

**FACULTY OF SCIENCE**

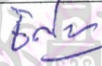



**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเลี้ยวเบนอันดับสูงด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิกในผลึกแบเรียมไททานเตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม  
Multi Higher-Order Anisotropic Self-Diffraction In Cerium Doped Barium Titanate Crystal

นักศึกษา นายฤทธิรงค์ นวลศรี  
รหัสประจำตัว 53650604  
ปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต  
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.ประธาน บุรณศิริ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.จิตินัย	แก้วแดง	
ผศ.ดร.นพรัตน์	โพธิ์ชัย	
ดร.สีปตระกุล	สุชาติ	
ดร.ประธาน	บุรณศิริ	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 18 พฤษภาคม พ.ศ. 2555 เวลา 13.00 – 16.00 น.  
สถานที่สอบ ณ ห้อง 307 ชั้น 3 อาคารจุฬารามวลัยลักษณ์ 1

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว  
(รองศาสตราจารย์ ดร.คณิน ธนสมบัติพันธ์)  
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 25 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 55

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเลี้ยวเบนอันดับสูงด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิกในผลึก  
แบเรียมไททานเตชชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม

นักศึกษา

นายฤทธิรงค์ นวลศรี

รหัสประจำตัว

53650604

ปริญญา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

พ.ศ.

2555

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ดร. ประธาน บุรณศิริ

### บทคัดย่อ

การเกิดลำแสงเลี้ยวเบนอันดับสูง (อันดับที่ 2 และ 3) ของปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก ซึ่งเป็นปรากฏการณ์หนึ่งที่มีผลจากปรากฏการณ์โพโตรีแฟรกทีฟ ในวัสดุที่มีคุณสมบัติทางทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น โดยในการทดลองใช้ผลึกแบเรียมไททานเตชชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม และใช้แหล่งกำเนิดแสงสีแดงความยาวคลื่น 633 นาโนเมตรจากเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ซึ่งในการทดลองเราได้สังเกตการเกิดลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 2 มีความเข้มแสงมากที่สุดที่มุมตกกระทบ 10.36 องศา และเกิดลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 2 และ 3 พร้อมกัน มีความเข้มแสงมากที่สุดที่มุมตกกระทบ 6.05 องศา โดยมีลำแสงจากแสงตกกระทบ 2 ลำ อยู่ที่ตำแหน่งกลางของลำแสงเลี้ยวเบนทั้งหมด ซึ่งต่างจากการทดลองที่ผ่านมาที่ลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 2 และ อันดับที่ 3 ไม่สามารถเกิดขึ้นพร้อมกัน และจากการสังเกตไม่สามารถสร้างคลื่นเฟสคอนจูเกตได้ทั้งก่อนและหลังการเกิดลำแสงเลี้ยวเบน แต่เมื่อใช้ลำแสงสีเขียวจากเลเซอร์อาร์กอน-ไอออน ที่ความยาวคลื่น 514.5 นาโนเมตร สามารถสร้างคลื่นเฟสคอนจูเกตได้

คำสำคัญ : การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก, ปรากฏการณ์โพโตรีแฟรกทีฟ,  
การเลี้ยวเบนอันดับสูง, ผลึกแบเรียมไททานเตชชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม

<b>Thesis Title</b>	Multi higher-order anisotropic self-diffraction in cerium doped barium titanate crystal
<b>Student</b>	Rittirong Nuansri
<b>Student ID</b>	53650604
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Program</b>	Applied Physics
<b>Year</b>	2012
<b>Thesis Advisor</b>	Dr. Prathan Buranasiri

### ABSTRACT

In this thesis, the multi higher-order anisotropic self-diffraction from photorefractive (PR) cerium doped barium titanate crystal (Ce: BaTiO<sub>3</sub>) has been investigated both in theoretical and experimental. In our experimental setup, the light at wavelength 633 nm from He-Ne laser has been incident on PR Ce: BaTiO<sub>3</sub>. From our observation, the second diffracted orders have been generated at the highest intensity with the incident angle 10.36 degree, while, in the first time of our knowledge, the second orders and the third orders diffraction have been generated simultaneously at the highest intensity with the incident angle 6.05 degree. Moreover, the phase conjugate beam has not been observed before and after the appearance of higher orders as observing when the green beam from the Argon-ion laser at 514.5 nm has been used.

**Keywords:** anisotropic self diffraction, photorefractive effect, higher order-diffraction, Ce: BaTiO<sub>3</sub> crystal

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำทางด้านทฤษฎีเกี่ยวกับปรากฏการณ์โฟโตรีเฟรกทีฟ และการทดลองการเกิดลำแสงเลี้ยวเบนในผลึกแบเรียมไททานेट ตลอดจนคอยให้ความช่วยเหลือในการจัดหาอุปกรณ์ทางแสงเพื่อใช้ในการทดลองจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.ประธาน บุรณศิริ และขอขอบพระคุณ รศ.ดร.จิตินัย แก้วแดง ดร.สืบตระกูล สุชาติ และ ผศ.ดร.นพรัตน์ โพธิ์ชัย ประธานกรรมการและกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ สำหรับคำแนะนำในการดำเนินงานวิจัย จัดทำเล่มวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ และคอยแนะนำข้อมูลที่มีประโยชน์ต่อการศึกษางานวิจัยให้มีคุณภาพมากขึ้น ขอขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกคน ที่ให้คำแนะนำแหล่งสืบค้นข้อมูลเพื่อศึกษางานวิจัย ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น ให้กำลังใจในการทำงาน และช่วยติดตามข่าวสารทางวิชาการต่างๆ เพื่อใช้ประกอบการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณโครงการพัฒนากำลังคนทางด้านวิทยาศาสตร์ (ทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย) สำหรับค่าใช้จ่ายในชีวิตประจำวัน ทุนการศึกษา งบประมาณในการดำเนินงานวิจัย งบประมาณการจัดอบรมทางวิชาการ และสนับสนุนในการเสนอผลงานวิชาการเพื่อเข้าร่วมการประชุมวิชาการต่างๆ

ขอขอบคุณหน่วยงานบัณฑิตศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับการสนับสนุนและอำนวยความสะดวกในงานด้านเอกสาร

ท้ายที่สุดขอขอบพระคุณบิดา-มารดา และสมาชิกในครอบครัวทุกคน ที่เลี้ยงดูข้าพเจ้ามาจนถึงปัจจุบัน ให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาเล่าเรียนจนถึงระดับบัณฑิตศึกษา และเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าตลอดมา ความดีทุกประการจงบังเกิดแก่สมาชิกทุกคนในครอบครัวของข้าพเจ้าให้ประสบสุขนิรันดร์

ฤทธิรงค์ นวลศรี

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	5
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ทักษะศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น.....	6
2.2 แบบจำลองการเคลื่อนย้ายประจุระหว่างแถบพลังงาน.....	8
2.3 การเดินทางของคลื่นแสงในตัวกลางแบบเป็นคาบ.....	17
2.3.1 ตัวกลางแบบเป็นคาบ.....	18
2.3.2 การเลี้ยวเบนของเบรกก์ในตัวกลางแอนไอโซโทรปิก.....	21
2.4 การเลี้ยวเบนของรามาน-เนท.....	24
2.5 ปรากฏการณ์คลื่นเฟสคอนจูเกต.....	28
2.6 ปรากฏการณ์การผสมคลื่นในตัวกลางโฟโตรีแฟรกทีฟ.....	30
2.6.1 ปรากฏการณ์ผสมคลื่น 4 ขบวน.....	31
2.7 ปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนแบบแอนไอโซโทรปิก.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศีกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	36
3.1 ศึกษาคุณสมบัติของผลึก.....	36
3.1.1 ผลึกแบเรียมไททานเตต.....	36
3.1.2 ผลึกแบเรียมไททานเตตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม.....	37
3.2 ขั้นตอนการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบ แอนไอโซโทรปิก.....	41
3.3 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง.....	43
3.3.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	43
3.3.2 การจัดระบบการทดลอง.....	44
3.4 ขั้นตอนการทดลองการเกิดปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบ แอนไอโซโทรปิก.....	46
3.5 วิธีการคำนวณมุมตกกระทบและมุมเลี้ยวเบนของลำแสงกับผลึก.....	49
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	51
4.1 มุมตกกระทบของลำแสงจากปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบ แอนไอโซโทรปิก.....	51
4.2 ภาพลำแสงเลี้ยวเบนของปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอน ไอโซโทรปิก.....	54
4.3 มุมเลี้ยวเบนของลำแสงจากปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบ แอนไอโซโทรปิก.....	59
4.4 ความเข้มแสงของลำแสงตกกระทบ และลำแสงเลี้ยวเบนแต่ละอันดับ.....	61
4.5 การเปรียบเทียบมุมตกกระทบ และมุมเลี้ยวเบนของลำแสง จากการทดลอง กับการคำนวณผลทางทฤษฎี.....	64
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	66
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	66
5.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	69
ภาคผนวก.....	70
ภาคผนวก ก. งานวิจัยที่ได้เข้าร่วมนำเสนอในการประชุมวิชาการระดับชาติ.....	71
ประวัติผู้เขียน.....	82



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของผลึกแบเรียมไททานต.....	40
4.1 แสดงตำแหน่งของผลึกและมุมตกกระทบเมื่อเกิดลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 และ 2 โดยใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน กำลังแสง 10 มิลลิวัตต์.....	52
4.2 แสดงตำแหน่งของผลึกและมุมตกกระทบเมื่อเกิดลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 และ 2 โดยใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน กำลังแสง 25 มิลลิวัตต์.....	53
4.3 แสดงตำแหน่งของผลึกและมุมตกกระทบเมื่อเกิดลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1, 2 และ 3 โดยใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน กำลังแสง 25 มิลลิวัตต์.....	54
4.4 แสดงมุมเลี้ยวเบนของแสงอันดับที่ 1 และอันดับที่ 2 โดยใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน กำลังแสง 10 มิลลิวัตต์.....	59
4.5 แสดงมุมเลี้ยวเบนของแสงอันดับที่ 1 และอันดับที่ 2 โดยใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน กำลังแสง 25 มิลลิวัตต์.....	60
4.6 แสดงมุมเลี้ยวเบนของแสงอันดับที่ 1, 2 และ 3 โดยใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออนกำลัง แสง 10 มิลลิวัตต์.....	60
4.7 แสดงความเข้มแสงตกกระทบ และแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 และ 2 โดยใช้เลเซอร์ ฮีเลียม-นีออนกำลังแสง 10 มิลลิวัตต์.....	61
4.8 แสดงความเข้มแสงตกกระทบ และแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 และ 2 โดยใช้เลเซอร์ ฮีเลียม-นีออนกำลังแสง 25 มิลลิวัตต์.....	62
4.9 แสดงความเข้มแสงตกกระทบ และแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1, 2 และ 3 โดยใช้เลเซอร์ ฮีเลียม-นีออนกำลังแสง 25 มิลลิวัตต์.....	63
4.10 ตารางเปรียบเทียบมุมตกกระทบ และมุมเลี้ยวเบนของลำแสง จากการทดลองและ การคำนวณทางทฤษฎี.....	64

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการดูดกลืนโฟตอนของอิเล็กตรอนเข้าสู่แถบนำกระแสด้วยแบบจำลองการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีเฟรกทีฟ.....	9
2.2 แสดงกระบวนการสร้างดัชนีเกรตติงด้วยการแทรกสอดของกลุ่มลำแสงตกกระทบที่มีความเข้มแสงแบบเป็นคาบลงบนตัวกลางอิเล็กโทรอปติกส์.....	13
2.3 แสดงการกระเจิงของคลื่นระนาบจากแสงเอกรงค์ลงบนตัวกลางแบบเป็นคาบ.....	19
2.4 แสดงการเลี้ยวเบนแสงในตัวกลางแบบเป็นคาบจากเกรตติงแบบบาง .....	21
2.5 แสดงการเลี้ยวเบนของแบรกก์ในตัวกลางแบบแอนไอโซโทรปิก ก) การเลี้ยวเบนของแสงจากเกรตติง ข) กฎการอนุรักษ์โมเมนตัมของเวกเตอร์คลื่น.....	22
2.6 แสดงการกระเจิงของแบรกก์ในตัวกลางแอนไอโซโทรปิกบนผลึกที่มีแกนเดียว.....	23
2.7 ก) แผนภาพการกระเจิงแบบต่อเนื่องเมื่อเวกเตอร์คลื่นของเกรตติงมีการกระจายเชิงมุม ข) แผนภาพการกระเจิงแบบต่อเนื่องเมื่อเวกเตอร์คลื่นของเกรตติงมีการกระจายเชิงเส้น...	24
2.8 แสดงการเลี้ยวเบนของรามาน-เนท.....	28
2.9 แสดงการกระเจิงของแบรกก์เนื่องจากเกรตติงแบบหนาในตัวกลางโฟโตรีเฟรกทีฟ.....	31
2.10 แสดงปรากฏการณ์การผสมคลื่น 4 ขบวนในตัวกลางโฟโตรีเฟรกทีฟ a) การผสมคลื่น 4 ขบวน ด้วยเกรตติงแบบส่งผ่าน (Transmission grating) เกรตติงเกิดขึ้น โดยคู่ของลำแสง ( $A_1, A_2$ ) หรือคู่ของลำแสง ( $A_3, A_4$ ) b) การผสมคลื่น 4 ขบวน ด้วยเกรตติงแบบสะท้อน (Reflection grating) เกรตติงเกิดขึ้น โดยคู่ของลำแสง ( $A_1, A_3$ ) หรือคู่ของลำแสง ( $A_2, A_4$ ).....	32
2.11 แสดงแผนภาพเวกเตอร์คลื่นของแสงเลี้ยวเบนอันดับ 1 และ 2 ของปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก.....	34
2.12 แสดงแผนภาพเวกเตอร์คลื่นของแสงเลี้ยวเบนอันดับ 1 และ 3 ของปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก.....	34

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 ก) โครงสร้างผลึกแบเรียมไททานต เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต	
ข) โครงสร้างผลึกแบเรียมไททานต เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต.....	37
3.2 แสดงกราฟการดูดกลืนแสงของผลึกแบเรียมไททานตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ.....	38
3.3 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ถูกเหนี่ยวนำของผลึกแบเรียมไททานตชนิดเจือด้วย อะตอมซีเรียม กับความเข้มแสง โดยใช้แสงความยาวคลื่น 514 นาโนเมตร.....	38
3.4 แสดงการเลี้ยวเบนแบบทั่วไปผ่านแผ่นเกรตติงเลี้ยวเบนจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ แสงสีแดง และแสงสีเขียว.....	41
3.5 แสดงการโพลาไรซ์ของลำแสงตกกระทบ เปรียบเทียบกับลำแสงเลี้ยวเบน เมื่อลำแสงเลเซอร์ตกกระทบตัวกลางเพียง 1 ลำ	
ก) การโพลาไรซ์ของแสงเลเซอร์เมื่อตกกระทบแผ่นเกรตติงเลี้ยวเบน	
ข) การโพลาไรซ์ของแสงเลเซอร์เมื่อตกกระทบวัสดุโพโตรีแฟรกทีฟ.....	42
3.6 แสดงแผนภาพการเกิดปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก	
ก) การเลี้ยวเบนของแสงตามเงื่อนไขการเลี้ยวเบนของแบรกก์	
ข) การเลี้ยวเบนของแสงผ่านวัสดุโพโตรีแฟรกทีฟ.....	43
3.7 แสดงการจัดอุปกรณ์การทดลองเพื่อศึกษาการเลี้ยวเบนอันดับสูงด้วยตัวเองแบบ แอนไอโซโทรปิกในผลึกแบเรียมไททานตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม.....	45
3.8 แสดงแผนภาพการจัดอุปกรณ์การทดลอง ดังแสดงในรูป 3.7.....	45
3.9 แสดงการปรับระยะผลึกด้วยรางเลื่อนในแกน x และ แกน y.....	47
3.10 แสดงการวัดระยะลำแสงตกกระทบ และลำแสงเลี้ยวเบนแต่ละอันดับที่ตกกระทบ บนฉากรับแสงของปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก.....	48
3.11 แสดงวิธีการคำนวณหามุมตกกระทบของแสงเลเซอร์กับผิวหน้าผลึก.....	49

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 แสดงผลึกแบเรียมไททานตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม ( $Ce:BaTiO_3$ ) ก) เมื่อไม่มีแสงตกกระทบผลึก ข) เมื่อส่องสว่างลำแสงตกกระทบผลึก.....	51
4.2 แสดงลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 และอันดับที่ 2 ของปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วย ตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก โดยใช้เลเซอร์กำลังแสง 10 มิลลิวัตต์.....	55
4.3 แสดงลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 และอันดับที่ 2 ของปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วย ตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก โดยใช้เลเซอร์กำลังแสง 25 มิลลิวัตต์.....	55
4.4 แสดงลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 อันดับที่ 2 และอันดับที่ 3 ของปรากฏการณ์การ เลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก โดยใช้เลเซอร์กำลังแสง 25 มิลลิวัตต์.....	56
4.5 แสดงการตรวจสอบแกนโพลาไรซ์ของลำแสงตกกระทบกับลำแสงเลี้ยวเบนอันดับสูง ก) แผ่นโพลาไรเซอร์ตั้งฉากกับแกนโพลาไรซ์แสง $Ko_2$ (ลำแสงเลี้ยวเบน 2 อันดับ) ข) แผ่นโพลาไรเซอร์ตั้งฉากกับแกนโพลาไรซ์แสง $Ko_4$ (ลำแสงเลี้ยวเบน 3 อันดับ).....	56
4.6 แสดงการถ่ายโอนพลังงานของลำแสงตกกระทบภายในผลึก เกิดลำแสงเลี้ยวเบน 2 อันดับ ก) ขวางลำแสงตกกระทบลำที่ 1 ข) ขวางลำแสงตกกระทบลำที่ 2.....	57
4.7 แสดงการถ่ายโอนพลังงานของลำแสงตกกระทบภายในผลึก เกิดลำแสงเลี้ยวเบน 3 อันดับ ก) ขวางลำแสงตกกระทบลำที่ 1 ข) ขวางลำแสงตกกระทบลำที่ 2.....	58

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

เนื่องจากแสงเดินทางเป็นเส้นตรงแบบต่อเนื่องในตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกัน ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแสง ( $v$ ) เท่ากับ  $c/n$  เมื่อ  $n$  คือค่าดัชนีการหักเหแสงในตัวกลาง และ  $c$  คือความเร็วของแสงในสุญญากาศ โดยที่ตำแหน่งผิวหน้าระหว่างตัวกลาง 2 ชนิด แสงจะเกิดการหักเห และการเลี้ยวเบน เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของสารไดอิเล็กทริก (Dielectric material) ในทัศนศาสตร์แบบเชิงเส้น ดัชนีการหักเหแสง  $n$  เป็นค่าคงตัว ขึ้นอยู่กับความถี่ หรือความยาวคลื่นของแสง ดังนั้นการหักเหและการเลี้ยวเบนของแสง จึงไม่ขึ้นกับค่าความเข้มของแสงที่ตกกระทบตัวกลาง ซึ่งเป็นหลักการทางทัศนศาสตร์แบบเชิงเส้น (Linear optics) [1]

เมื่อเริ่มมีนักวิจัยสนใจ การทดลองเพื่อเปรียบเทียบความเข้มของลำแสงกับสนามไฟฟ้าภายในอะตอม และการกระจายตัวของอิเล็กตรอนภายในตัวกลาง ซึ่งถูกกระตุ้นจากการแผ่รังสีของลำแสง และจากการหักเหและการเลี้ยวเบนของแสงที่ตำแหน่งผิวหน้าและเดินทางผ่านเข้าไปในตัวกลาง ส่งผลให้ดัชนีหักเหแสงในตัวกลางแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความเข้มของลำแสงตกกระทบ ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear optics) และเกิดขึ้นในตัวกลางแบบอิเล็กโตรออปติกส์ (Electro optic) โดยในตัวกลางแบบนี้สามารถเกิดปรากฏการณ์หนึ่งที่น่าสนใจคือปรากฏการณ์โฟโตรีแฟกทีฟ (Photorefractive effect : PR) ซึ่งปรากฏการณ์นี้ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์อื่น ๆ อีก เช่น ปรากฏการณ์การผสมคลื่น 2 ขบวน (Two-wave mixing) ปรากฏการณ์การผสมคลื่น 4 ขบวน (Four-wave mixing) ปรากฏการณ์คลื่นเฟสคอนจูเกต (Phase conjugate wave) และปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic self-diffraction : ASD) ซึ่งได้รับความสนใจในการศึกษาและทดลองของนักวิจัยเป็นอย่างมาก โดยลักษณะหนึ่งที่สำคัญของปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซทรอปิก คือความแตกต่างการโพลาไรซ์ของลำแสงที่สัมพันธ์กันในผลึกโฟโตรีแฟกทีฟ ซึ่งแกนโพลาไรซ์ของลำแสงตกกระทบตั้งฉากกับแกนโพลาไรซ์ของลำแสงเลี้ยวเบน จึงเรียกตัวกลางหรือผลึกประเภทนี้ว่าตัวกลางโฟโตรีแฟกทีฟ (Photorefractive medium) หรืออาจเรียกว่าตัวกลางทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear optic medium) ซึ่งในระดับพื้นฐานทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นจะศึกษาเกี่ยวกับอันตรกิริยาของลำแสงภายในวัสดุ การที่เรียกทัศนศาสตร์ไม่เชิงเส้นเพราะว่า วัสดุมีความสามารถในการตอบสนองต่อแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าอย่างไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งการเดินทางของลำแสงในวัสดุตัวกลางอธิบายโดยใช้ค่าดัชนีหักเหแสง ถ้าสามารถควบคุมการเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหแสงใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวกลางได้จากการส่องสว่างของลำแสง ดังนั้นจะสามารถควบคุมการเดินทางของลำแสงได้โดยใช้ลำแสงอีกลำหนึ่ง นำไปสู่การสร้างนวัตกรรมเทคโนโลยีใหม่ ๆ อีกมากมายบนพื้นฐานของการควบคุมแสงโดยใช้แสงลำเดียวจากลำแสงตกกระทบ [1]

ปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟในตัวกลางแบบอเล็กโตรออปติกส์เป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้ดัชนีหักเหแสงในตัวกลางเปลี่ยนเนื่องจากความเข้มแสงที่ผ่านเข้ามาในพื้นที่ว่างของตัวกลาง ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เมื่อ ในปี ค.ศ. 1966 Ashkin *et. al.* ได้ค้นพบเป็นครั้งแรก ในผลึกลิเทียมไนโอเบต ( $\text{LiNbO}_3$ ) โดยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการส่องผ่านของลำแสงเลเซอร์ ซึ่งเป็นแสงที่มีคุณสมบัติความเป็นโคฮีเรนต์ (Coherent light) ผ่านผลึกแบบอเล็กโตรออปติกส์ ในการศึกษาครั้งนี้พบว่า ลำแสงเลเซอร์ที่ผ่านผลึกอเล็กโตรออปติกส์ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลาง และสามารถเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟขึ้น ต่อมาได้มีการทดลองและสังเกตรูปปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟในตัวกลางจำนวนมาก ยกตัวอย่างเช่น ลิเทียมไนโอเบต ( $\text{LiNbO}_3$ ) แบเรียมไททาเนต ( $\text{BaTiO}_3$ ) แกลเลียมอาเซไนด์ ( $\text{GaAs}$ ) แคดเมียมเทลลูไรด์ ( $\text{CdTe}$ ) อินเดียมฟอสไฟด์ ( $\text{InP}$ ) วัสดุอวกศกัควอนตัมแบบหลายบ่อ (Multi quantum well materials) และวัสดุออร์แกนิก (Organic material) หรือ พอลิเมอร์บางชนิด [1]

ในปี ค.ศ.1984 N.V. Kukhtarev และคณะได้ศึกษาและทดลองเกี่ยวกับการเกิดปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก (Anisotropic self-diffraction) ในผลึก  $\text{BaTiO}_3$  โดยไม่ต้องจ่ายสนามไฟฟ้าจากภายนอกให้กับผลึกในการสร้างสนามที่ว่างประจุ (Space-charge field) ซึ่งในการทดลองใช้เลเซอร์อาร์กอน-ไอออนความยาวคลื่น 496.5 นาโนเมตร สามารถสังเกตเห็นลำแสงเลี้ยวเบนถึงอันดับที่ 2 โดยมุมตกกระทบของลำแสงทั้งสองกับผลึกเท่ากับ 12 องศา มุมเลี้ยวเบนระหว่างลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 2 เท่ากับ 38.5 องศา และสามารถสังเกตเห็นปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกต (Phase conjugate) ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้เป็นการสังเกตพบปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิกได้เป็นครั้งแรก [2]

ในปี ค.ศ. 1985 Doyle A. Temple และ Cardinal Warde ได้ศึกษาการกระเจิงของแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟ เช่น  $\text{BaTiO}_3$  และ  $\text{LiNbO}_3$  สามารถสังเกตเห็นลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 ในผลึก  $\text{LiNbO}_3$  และคำนวณประสิทธิภาพการเลี้ยวเบน (Diffraction efficiency) โดยประมาณได้เท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ และสามารถสังเกตเห็นลำแสงเลี้ยวเบนทั้งอันดับที่ 1 และ 2 ในผลึก  $\text{BaTiO}_3$  และคำนวณประสิทธิภาพการเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 ได้เท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ และอันดับที่ 2 ได้น้อยกว่า 1% โดยมุมตกกระทบของลำแสงทั้ง 2 ลำกับผลึกเท่ากับ 12.5 องศา ซึ่งมุมตกกระทบที่ได้จากการทดลองใกล้เคียงกับมุมตกกระทบจากการคำนวณตามเงื่อนไขมุมของแบรกก์ (Bragg's angle) [3] จากนั้นในปี ค.ศ. 1988 Doyle A. Temple และ Cardinal Warde ได้ทำการศึกษาและทดลองเพิ่มเติม โดยศึกษาการเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิกในผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟเช่นเดิม แต่ครั้งนี้ได้ทดลองโดยใช้ผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟหลายชนิด คือ แบเรียมไททาเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(BaTiO<sub>3</sub>) สตรอนเทียมแบเรียมไนโอเบต (Sr<sub>x</sub>Ba<sub>1-x</sub>Nb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> หรือ SBN) และแบเรียมสตรอนเทียมโพตัสเซียมโซเดียมไนโอเบต (Ba<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>K<sub>1-y</sub>Na<sub>y</sub>Nb<sub>3</sub>O<sub>15</sub> หรือ BSKNN) ซึ่งสามารถสังเกตเห็นลำแสงเลี้ยวเบนถึงอันดับที่ 4 ในผลึก BaTiO<sub>3</sub> และ SBN สังเกตเห็นลำแสงเลี้ยวเบนถึงอันดับที่ 5 ในผลึก BSKNN แต่อันดับของลำแสงเลี้ยวเบนทั้งหมดไม่สามารถเกิดขึ้นพร้อมกันได้ และมุมตกกระทบของลำแสงก็เป็นไปตามการทดลองในครั้งแรก และเป็นไปตามแบบจำลองสมการ Kukhtarev's equation [4]

เมื่อมีนักวิจัยสนใจในการศึกษาและทดลองเกี่ยวกับการเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิกในผลึกโพโตรีแฟรกทีฟจำนวนมาก แต่ผลึกโพโตรีแฟรกทีฟที่นักวิจัยได้นิยมนำมาศึกษาคือ BaTiO<sub>3</sub> เพราะผลึกชนิดนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูง และสามารถสังเกตเห็นอันดับการเลี้ยวเบนของปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิกได้ง่ายที่สุด ในปี ค.ศ. 1995 Changxi Yang และเพื่อนร่วมงานจึงได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติโพโตรีแฟรกทีฟของผลึกแบเรียมไททานेट กับ ผลึกแบเรียมไททานेटที่เจือด้วยอะตอมซีเรียม (Ce : BaTiO<sub>3</sub>) ซึ่งในการศึกษาพบว่าผลึกแบเรียมไททานेटที่เจือด้วยอะตอมซีเรียม สามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption coefficient) สัมประสิทธิ์การขยายอิเล็กโทรออปติกส์ (Electro-optic gain coefficient) และความหนาแน่นของกับดักยังผลทั้งหมด (Total effective trap density) อย่างเป็นระบบตามความเข้มข้นของอะตอมซีเรียม (Ce) ที่เพิ่มขึ้น ที่ความยาวคลื่นแสง 514.5 นาโนเมตร และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับสัมประสิทธิ์การขยายอิเล็กโทรออปติกส์ ขึ้นอยู่กับความเข้มแสงที่ตกกระทบ และยังพบว่าเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อแสง (Response time) ของผลึกที่เจือด้วยอะตอมซีเรียม น้อยกว่าผลึกที่ไม่ได้เจือด้วยอะตอมซีเรียม โดยผลึกแบเรียมไททานेटชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม ด้วยความเข้มข้น 15 ppm ที่ความเข้มแสง 800 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร ใช้เวลาในการตอบสนองต่อแสงแค่ 220 มิลลิวินาที และสามารถขยายช่วงความยาวคลื่นการตอบสนองต่อแสงของผลึกกว้างขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มคุณสมบัติโพโตรีแฟรกทีฟของผลึกแบเรียมไททานेट [5]

ต่อมาในปี ค.ศ. 2000 Yongyuan Jiang และเพื่อนร่วมงานได้ศึกษาวิเคราะห์และทดลองเกี่ยวกับการเกิดปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิกในผลึกโพตัสเซียมโซเดียมสตรอนเทียมแบเรียมไนโอเบตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม (Ce:KNSBN) โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน (He-Ne laser) ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร เป็นลำแสงตกกระทบ 2 ลำมีกำลังเลเซอร์ประมาณ 10 มิลลิวัตต์ และในการทดลองจ่ายสนามไฟฟ้าจากภายนอกประมาณ 6 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร สามารถสังเกตเห็นการส่งผ่านพลังงานของแสงตกกระทบ 2 ลำกับผลึกเพื่อสร้างเกรตติง และสามารถสังเกตเห็นลำแสงเลี้ยวเบนจากปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิกถึงอันดับที่ 2 มีมุมตกกระทบของลำแสงเท่ากับ 17.36 องศา ซึ่งใกล้เคียงกับมุมตกกระทบจากการคำนวณทางทฤษฎีเท่ากับ 17.2 องศา และได้สังเกตเห็น

อีกว่าแกนโพลาริซของลำแสงตกกระทบกับลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 2 ตั้งฉากกัน และความเข้มของลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 2 น้อยกว่าความเข้มของลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 [6]

จากการศึกษาและทดลองของนักวิจัยที่ผ่านมาในการเกิดปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิกในผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟ ซึ่งสามารถสังเกตเห็นลำแสงเลี้ยวเบนอันดับสูงได้ในผลึก BaTiO<sub>3</sub> ผลึก SBN ผลึก BSKNN และ ผลึก KNSBN [2-4], [6] โดยลำแสงเลี้ยวเบนแต่ละอันดับไม่สามารถเกิดขึ้นพร้อมกันได้ ซึ่งแตกต่างกับงานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิกในผลึกแบเรียมไททานเตชนิคเจือด้วยอะตอมซีเรียม โดยไม่ต้องจ่ายสนามไฟฟ้าภายนอกให้กับผลึก และสามารถสังเกตเห็นลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 อันดับที่ 2 และอันดับที่ 3 สามารถเกิดขึ้นพร้อมกัน

นอกจากนี้ในกระบวนการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟมีการถ่ายโอนพลังงานระหว่างลำแสงที่เดินทางในผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านแสงจำนวนมาก เช่น การเกิดเฟสคอนจูเกต (Phase conjugate) ความสัมพันธ์ทางแสง (Optical correlation) พลวัตฮอโลกราฟี (Dynamic holography) การตรวจสอบลักษณะของคลื่นแสง (Optical pattern recognition) ตัวแปลงเชิงแสง (Optical convertor) และการประยุกต์ใช้ด้านอื่น ๆ [1]

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟที่เกิดขึ้นในผลึกแบเรียมไททานเตชนิคเจือด้วยอะตอมซีเรียม
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการเกิดปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิกด้วยผลึกแบเรียมไททานเตชนิคเจือด้วยอะตอมซีเรียม
- 1.2.3 เพื่อศึกษามุมตกกระทบที่เหมาะสมที่สุดระหว่างลำแสงตกกระทบกับผลึกในการเกิดปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก ด้วยความเข้มแสงมากที่สุด หรือสามารถสังเกตลำแสงเลี้ยวเบนได้ชัดเจนที่สุด
- 1.2.4 เพื่อศึกษาความแตกต่างทิศทางการโพลาริซของลำแสงตกกระทบ กับลำแสงเลี้ยวเบนอันดับสูง จากปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษา และสังเกตลำแสงการเลี้ยวเบนอันดับสูงของปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก ซึ่งเป็นปรากฏการณ์หนึ่งที่มีผลจากปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟในผลึกแบเรียมไททานเตชนิคเจือด้วยอะตอมซีเรียม ซึ่งเป็นผลึกที่มีเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติโฟโตรีแฟรคทีฟ และเป็นผลึกแบบอเล็กโตรออปติกส์ โดยปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรคทีฟเป็นปรากฏการณ์แบบทัศนศาสตร์ไม่เป็นเชิงเส้น สามารถแบ่งขอบเขตงานวิจัยได้ดังนี้

- 1.3.1 ศึกษาค้นคว้าและทบทวนบทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ โฟโตรีแฟรคทีฟ และปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิกและการประยุกต์ใช้งาน
  - 1.3.2 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรคทีฟ การเกิดปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก และการเดินทางของแสงในตัวกลางแบบไม่เชิงเส้น เพื่อใช้ประกอบการอธิบายผลการทดลอง
  - 1.3.3 วัดมุมตกกระทบที่เหมาะสมของลำแสงเลเซอร์ 2 ลำ ที่ตัดกันกลางผลึกแบเรียมไททานเตชนิดเนื้อเดียวอะตอมซีเรียม โดยวางผลึกบนแท่นที่ติดตั้งอยู่บนรางเลื่อน เพื่อปรับระยะห่างของผลึกเข้าและออกจากแหล่งกำเนิดแสง ทำให้เกิดลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 2 และอันดับที่ 3 พร้อมกัน และมีความเข้มแสงมากที่สุด
  - 1.3.4 วิเคราะห์ทิศทางการโพลาไรซ์ของลำแสงการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นทั้งหมด โดยใช้แผ่นโพลาไรเซอร์ในการตรวจสอบความแตกต่าง
  - 1.3.5 เปรียบเทียบมุมเลี้ยวเบนของลำแสงที่ได้จากการทดลอง กับมุมเลี้ยวเบนที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี
- 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย**
- 1.4.1 สามารถอธิบายการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรคทีฟ และปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิกที่เกิดขึ้นในวัสดุทางทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นได้
  - 1.4.2 สามารถอธิบายอันตรกิริยาของลำแสงเลเซอร์ 2 ลำที่ตกกระทบตัวกลางแบบอเล็กโตรออปติกส์ และการเดินทางของแสงออกจากตัวกลางได้
  - 1.4.3 สามารถอธิบายหลักการใช้อุปกรณ์ทางแสงในการควบคุมลำแสงเลเซอร์ตามทิศทางการใช้งาน ตลอดจนข้อควรระวัง การทำความสะอาด และการเก็บรักษาอุปกรณ์ให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน
  - 1.4.4 สามารถออกแบบการทดลอง เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่มีประสิทธิภาพ
  - 1.4.5 สามารถนำผลการทดลองที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับงานอื่น ๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น

ค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลางโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของอะตอมและการกระจายตัวของอิเล็กตรอนในตัวกลางนั้น เมื่อส่องสว่างลำแสงลงบนตัวกลาง ทำให้ประจุซึ่งส่วนมากเป็นอิเล็กตรอนถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ขึ้นและลงตามทิศการโพลาไรซ์ของสนามไฟฟ้าของแสงตกกระทบ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทำให้เกิดการแผ่รังสีและสร้างสนามไฟฟ้าภายในตัวกลาง ซึ่งเป็นสัดส่วนกับสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบ เป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟส (Phase) ในการส่งผ่านสนามไฟฟ้า ซึ่งการเปลี่ยนเฟสของสนามไฟฟ้าจะเกิดช้ากว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของแสง ถ้าความเข้มของลำแสงตกกระทบมีค่าน้อย ดังนั้นสนามไฟฟ้าของลำแสงต้องมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับสนามไฟฟ้าภายในอะตอมของตัวกลาง แสดงให้เห็นว่าความเข้มแสงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนเฟสของสนามไฟฟ้า และไม่มีผลต่อการเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลาง ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางทัศนศาสตร์แบบเชิงเส้น (Linear optics) [1]

เมื่อเปรียบเทียบความเข้มของลำแสงกับสนามไฟฟ้าภายในอะตอม และการกระจายตัวของอิเล็กตรอนภายในตัวกลาง สามารถถูกกระตุ้นจากการแผ่รังสีของลำแสง เมื่อแสงเดินทางผ่านเข้าไปในตัวกลาง แสงจะเกิดการหักเหและการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่งผิวหน้าของตัวกลาง ส่งผลให้ค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลางเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับความเข้มของลำแสงตกกระทบ (Intensity) ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear optics) ในระดับพื้นฐานทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นจะศึกษาเกี่ยวกับอันตรกิริยาของลำแสงภายในวัสดุ การที่เรียกทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น เพราะว่า วัสดุมีความสามารถในการตอบสนองต่อแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าอย่างไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งการเคลื่อนที่ของลำแสงในวัสดุตัวกลางอธิบายโดยใช้ค่าดัชนีหักเหแสงที่เปลี่ยนไป ถ้าสามารถควบคุมค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลางได้จากการส่องสว่างของลำแสง ดังนั้นจะสามารถควบคุมการเดินทางของลำแสงได้ นำไปสู่การสร้างนวัตกรรมเทคโนโลยีใหม่ ๆ จำนวนมากบนพื้นฐานของการควบคุมแสงโดยใช้แสงตกกระทบเพียงลำเดียว

ในทฤษฎีสันนามแม่เหล็กไฟฟ้าของแสง วัสดุจะตอบสนองต่อการส่องสว่างของแสง ซึ่งอธิบายโดยใช้สมการการโพลาไรซ์ของแสง [1]

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi^{(1)} \mathbf{E} + \epsilon_0 \chi^{(2)} \mathbf{E}\mathbf{E} + \epsilon_0 \chi^{(3)} \mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{E} + \dots \quad (2.1)$$

เมื่อ  $P$  คือโพลาไรเซชันที่ถูกเหนี่ยวนำในตัวกลางในหน่วยคูลอมบ์ต่อตารางเมตร ( $C/m^2$ ) [16]  
 $\epsilon_0$  คือ สภาพความยอมทางไฟฟ้าในสุญญากาศในหน่วยคูลอมบ์ต่อนิวตัน-เมตร ( $C/N\cdot m$ )  
 $E$  คือ สนามไฟฟ้าของแสงในหน่วยนิวตันต่อคูลอมบ์ ( $N/C$ )  
 $x^{(1)}, x^{(2)}, x^{(3)}$  คือค่าความไวต่อสนามไฟฟ้าของตัวกลางในหน่วยคูลอมบ์ต่อเมตร ( $C/m$ )

ในทัศนศาสตร์แบบเชิงเส้นใช้  $x^{(1)}$  ในการอธิบาย ซึ่งสัมพันธ์กับค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลาง [1]

$$n^2 = 1 + x^{(1)} \quad (2.2)$$

ส่วนในทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นการตอบสนองต่อแสงของตัวกลางจะมีลักษณะเฉพาะ โดยที่ค่าพารามิเตอร์  $x^{(2)}$  และ  $x^{(3)}$  ทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่น่าสนใจมากมาย และการประยุกต์ใช้จากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น จากเทอมที่ 2 ในสมการ (2.1)  $\epsilon_0 x^{(2)} \mathbf{E}\mathbf{E}$  เป็นเทอมของการเกิดฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 (ความถี่เป็นสองเท่า) มีค่าเป็นบวก และมีความถี่ที่แตกต่างกัน เพื่อขยายค่าพารามิเตอร์และการสั่น ส่วนเทอมที่ 3 ในสมการ (2.1)  $\epsilon_0 x^{(3)} \mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{E}$  เป็นเทอมการเกิดฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 ซึ่งใช้อธิบายการเกิดปรากฏการณ์ต่าง ๆ เช่น การกระเจิงของรามาน หรือการเกิดโฟนอนแสง (Raman scattering) การกระเจิงของบริลลูอิน หรือการเกิดโฟนอนเสียง (Brillouin scattering) และการเกิดเฟสคอนจูเกตเชิงแสง (Optical phase conjugation)

สำหรับแสงตกกระทบตัวกลางที่มีความเข้มต่ำ ๆ เทอมอันดับที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าน้อยมาก และอธิบายสมการของแสงโดยใช้เฉพาะเทอมที่ 1  $\epsilon_0 x^{(1)} \mathbf{E}$  โดยเทอมที่ 2 สามารถเปลี่ยนเพื่อแสดงในตัวแปรของเทอมที่ 1 ได้ดังสมการ [1]

$$\Delta x^{(1)} = x^{(2)} \mathbf{E} \quad (2.3)$$

สำหรับตัวกลางทางแสงทั่วไป  $x^{(1)}$  เป็นค่าความไวของสนามไฟฟ้าในอันดับที่ 1 ซึ่งความเข้มของแสงปกติ หรือแสงสามัญ (Ordinary light) จะเหมือนกับความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ระดับน้ำทะเล และสนามไฟฟ้าของแสงในอันดับที่ 1 เท่ากับ 10 โวลต์ต่อเซนติเมตร และ  $\Delta x^{(1)}$  เท่ากับ  $10^{-8}$  ถึง  $10^{-10}$  คูลอมบ์ต่อเมตร สำหรับลำแสงเลเซอร์ที่มีกำลังปานกลางจะมีสนามไฟฟ้าเทียบกับสนามไฟฟ้าภายในอะตอมของตัวกลาง เท่ากับ  $10 \times 10^6$  โวลต์ต่อเซนติเมตร ซึ่งการส่องสว่างลำแสงเลเซอร์ลงบนวัสดุที่เหมาะสมส่งผลให้ค่าดัชนีการหักเหแสงในตัวกลางนั้น ๆ เปลี่ยนแปลง อาจจะมีผลต่อการเดินทางของแสงภายในวัสดุตัวกลางนั้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อนปี ค.ศ. 1961 นักวิทยาศาสตร์ยังไม่มีความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติทางทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น จึงมีการวิจัยทางวิทยาศาสตร์เพื่อแสดงให้เห็นว่าความเข้มของแสง และลำแสงอื่น ๆ ไม่ส่งผลกระทบต่อ การส่งผ่าน การเลี้ยวเบน และการหักเหของแสงในวัสดุโปร่งแสง เป็นคุณสมบัติทางทัศนศาสตร์เชิงเส้น และหลักการพื้นฐานของการซ้อนทับของคลื่นแสง และลักษณะเฉพาะของวัสดุโปร่งแสงคือ ความเข้มแสงไม่ส่งผลกระทบต่อค่าดัชนีการหักเหแสงในตัวกลาง ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงสรุปคุณสมบัติทางทัศนศาสตร์แบบเชิงเส้นว่า ความเข้มแสงที่ออกจากตัวกลางที่มีความเข้มสม่ำเสมอจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสงที่ผ่านเข้าไปในตัวกลางและความถี่ของแสงที่ผ่านออกจากตัวกลาง หมายความว่าความเข้มแสงที่ผ่านเข้าไปและยังคงอยู่ในตัวกลาง ส่วนปรากฏการณ์ทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นยังไม่มีการศึกษาอย่างจริงจังมาก่อนหน้านี้ ทำให้มีการนำเครื่องมือในการจัดการและควบคุมความถี่และความเข้มของลำแสงเลเซอร์มาใช้ เพื่อศึกษาและคิดค้นทฤษฎีใหม่ ๆ ของการประยุกต์ใช้ทางทัศนศาสตร์อย่างกว้างขวาง [1],[7]

เหตุผลหนึ่งก่อนหน้านี้ที่ทำให้การตีความทัศนศาสตร์แบบเชิงเส้นที่นักวิทยาศาสตร์ยังไม่สามารถสร้างลำแสงที่มีคุณสมบัติโคฮีเรนซ์ได้ (แสงที่มีความยาวคลื่นเดียว) ซึ่งทำให้ถูกตีความว่าเป็นปรากฏการณ์แบบไม่เชิงเส้น ในปี ค.ศ. 1961 การทดลองการเกิดฮาร์โมนิกอันดับที่ 2 เป็นการทดลองครั้งแรกเพื่อยืนยันทฤษฎีทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น โดยทดลองนำเลเซอร์ทับทิม (Ruby laser) มีความยาวคลื่น 0.6943 ไมโครเมตร ส่งสว่างลงบนผิวหน้าของแผ่นผลึกควอทซ์ ผลการทดลองพบว่าการแผ่รังสีของคลื่นแสงออกมา โดยใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ในการตรวจสอบและมีการแผ่รังสีของแสงเป็นความถี่ที่สองของความถี่แสงตกกระทบบนแผ่นผลึกควอทซ์ (ความยาวคลื่นเท่ากับ 0.34715 ไมโครเมตร) [1]

ตั้งแต่มีการทดลองศึกษาการเกิดฮาร์โมนิกของแสง ส่งผลให้การศึกษาเพื่อหาสนามไฟฟ้าทางทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นก็ได้เป็นที่รู้จักกันอย่างรวดเร็ว และได้ค้นพบปรากฏการณ์ทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นที่แตกต่างกัน เช่น การผสมพารามิเตอร์ของแสง (Optical parametric mixing) การกระเจิงของบริลลูอิน (Stimulated Brillouin scattering) ปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกต (Phase conjugate) การผสมคลื่น (Wave mixing) และ อื่น ๆ ซึ่งปรากฏการณ์ทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นต้องใช้ลำแสงเลเซอร์ที่มีความเข้มสูง โดยเฉพาะในกระบวนการศึกษาการเกิดฮาร์โมนิกอันดับที่สูงขึ้นต้องใช้ความเข้มแสงที่สูงมาก (ฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 ขึ้นไป)

## 2.2 แบบจำลองการเคลื่อนย้ายประจุระหว่างแถบพลังงาน

การพิจารณาจากแบบจำลองการเคลื่อนย้ายประจุระหว่างแถบพลังงาน (Band transport model) หรือ สมการของคุกทาร์ฟ (Kukhtarev's equation) ซึ่งเป็นผู้สร้างแบบจำลองขึ้นมาเพื่อใช้อธิบายการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ โดยในแบบจำลองพื้นฐานตัวกลางโฟโตรีแฟรกทีฟ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบด้วยสารเจือบางชนิด หรืออาจมีความไม่สมบูรณ์ในตัวกลางนั้น ดังนั้นในการอธิบายหลักการอย่างง่ายของการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟกทิฟถือว่าสารเจือผู้ให้ (Donor impurity) ทั้งหมดเหมือนกันและอยู่ที่ระดับพลังงานเดียวกันในแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งสารเจือผู้ให้เหล่านั้นสามารถแตกตัวเป็นไอออนได้เนื่องจากการดูดกลืนโฟตอนจากแสงที่ตกกระทบตัวกลาง และการแตกตัวเป็นไอออนทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่เข้าไปบริเวณแถบนำกระแสได้ (Conduction band) ปล่อยให้ว่างไว้ที่ตำแหน่งเดิมและสารเจือผู้ให้กลายเป็นไอออนมีความสามารถในการจับกับอิเล็กตรอนอิสระได้อีกครั้ง กำหนดให้

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

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

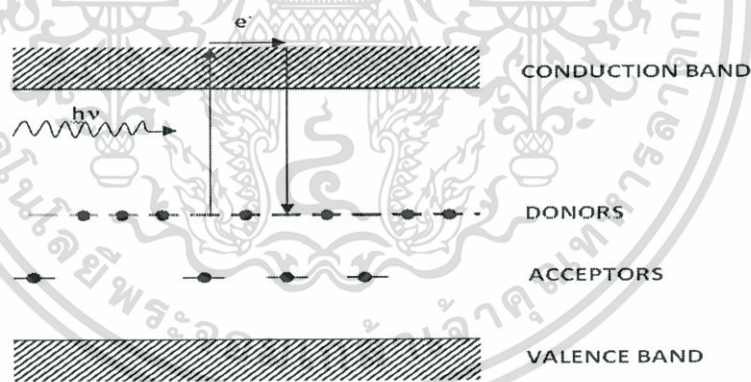
$N$  คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ ในหน่วยอะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ( $\text{atom}/\text{cm}^3$ )

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

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

$\beta$  คือ อัตราการเกิดความร้อนของอิเล็กตรอน

$\gamma_R$  คืออัตราการรวมตัวกันใหม่ระหว่างกับดักที่เป็นไอออนกับอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.1 แสดงการดูดกลืนโฟตอนของอิเล็กตรอนเข้าสู่แถบนำกระแส ด้วยแบบจำลองการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟกทิฟ [1]

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

สำหรับไอออนของสารเจือทั้งหมดที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา หรืออิเล็กตรอนจะถูกจับใหม่อีกครั้งเมื่อเติมสารเจือใหม่ลงในที่ว่างของตัวกลาง ดังนั้นอัตราการเกิดอิเล็กตรอนเท่ากับอัตราการเกิดไอออนของสารเจือ นอกจากนี้ว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในขณะที่สารเจืออยู่กับที่ไม่เกิดการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญสำหรับการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟกทีฟ และการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระอาจส่งผลต่อความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ดังนั้นสมการอัตราความหนาแน่นของอิเล็กตรอนคือ

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

เมื่อ  $\mathbf{j}$  คือ ความหนาแน่นกระแส ในหน่วยแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ( $A/cm^2$ )

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

จากสมการแสดงให้เห็นว่าประจุพาหะ หรืออิเล็กตรอน ทำให้เกิดสนามที่ว่างประจุ (Space-charge field) ซึ่งส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของประจุพาหะ ดังนั้นความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอนประกอบด้วยส่วนที่เกิดจากการไหลของประจุพาหะเนื่องจากสนามไฟฟ้า และการแพร่กระจายเนื่องจากเกรเดียนต์ของความหนาแน่นประจุพาหะ สามารถเขียนสมการได้ ดังนี้

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

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

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

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

และอธิบายสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยใช้สมการของปัวส์ซง (Poisson's equation)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\epsilon$  คือสภาพความยอมทางไฟฟ้าของตัวกลางในหน่วยคูอมบ์ต่อนิวตัน-เมตร (C/N-m)  
 $\rho(r)$  คือค่าความหนาแน่นประจุ ในหน่วยคูอมบ์ต่อลูกบาศก์เมตร (C/m<sup>3</sup>)  
 $N_A$  คือความหนาแน่นของสารเจือผู้รับในหน่วยอะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (atom/cm<sup>3</sup>)

ซึ่งสารเจือผู้รับ (Acceptor impurity) มีความสำคัญต่อความเป็นกลางทางไฟฟ้าของประจุ ในกรณีที่ไม่มีการส่องสว่างแสง ความเป็นกลางของประจุสามารถเขียนได้ดังสมการ

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

ในกรณีที่ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยมาก ทำให้  $N_D^i = N_A$  ในสถานะที่ไม่มีแสง หรือความเข้มของสารเจือผู้ให้ เท่ากับ ความหนาแน่นของสารเจือผู้รับ จากสมการ (2.6) เทอมแรก ( $qN\mu E$ ) แสดงถึงความหนาแน่นกระแสจากการไหลของประจุพาหะเนื่องจากสนามไฟฟ้า และเทอมที่สอง ( $k_B T \mu \nabla N$ ) แสดงถึงความหนาแน่นกระแสจากการแพร่กระจายเนื่องจากเกรเดียนต์ของประจุ แต่ในกรณีนี้เราไม่พิจารณากระแสเนื่องจากปรากฏการณ์โฟโตโวลเทอิก (Photovoltaic effect) เนื่องจากมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกระแสที่เกิดจากประจุพาหะ

รูปที่ 2.1 ประกอบด้วยสารเจือผู้ให้และสารเจือผู้รับ โดยปกติความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้จะมากกว่าความหนาแน่นของสารเจือผู้รับ และสมมุติว่าสารเจือทั้งหมดเหมือนกัน ในกรณีที่ไม่มีอิเล็กตรอนในแถบนำกระแส และไม่มีโฮลในแถบวาเลนซ์ ความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้ที่เป็นไอออนจะเท่ากับสารเจือผู้รับ ซึ่งสารเจือผู้ให้ที่เป็นกลางสามารถให้อิเล็กตรอนจากการกระตุ้นด้วยแสง (Photon excitation) และไอออนของสารเจือผู้ให้จำนวนหนึ่งสามารถจับกับโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) ในแบบจำลองนี้สารเจือผู้รับมีหน้าที่เพียงทำให้ประจุเป็นกลางทางไฟฟ้า ไม่ได้มีผลโดยตรงต่อกระบวนการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟกทีฟ

ในตอนนี้เราจะพิจารณาการที่แสงเลเซอร์ 2 ลำเดินทางเข้าสู่ตัวกลางโฟโตรีแฟกทีฟ เขียนสมการสนามไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_a \exp(i\omega t - i\mathbf{k}_a \cdot \mathbf{r}) + \mathbf{E}_b \exp(i\omega t - i\mathbf{k}_b \cdot \mathbf{r}) \quad (2.9)$$

สมมุติให้ความถี่ของแสงเลเซอร์ 2 ลำเท่ากัน เมื่อ  $\mathbf{E}_a$ ,  $\mathbf{E}_b$  คือแอมพลิจูดสนามไฟฟ้าของคลื่น  $\mathbf{k}_a$ ,  $\mathbf{k}_b$  คือ เวกเตอร์คลื่น ถ้าสถานะการโพลาไรซ์ของคลื่นแสงทั้ง 2 ลำไม่ตั้งฉากกัน ดังนั้นสามารถเขียนรูปแบบลักษณะการแทรกสอดของคลื่นด้วยความเข้มแสง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $I_0 = |\mathbf{E}_a|^2 + |\mathbf{E}_b|^2$  (2.11)

$$I_1 = 2\mathbf{E}_b \cdot \mathbf{E}_a^* \quad (2.12)$$

และ  $\mathbf{K}$  คือเวกเตอร์คลื่นเกรตติง (Grating wave vector)

$$\mathbf{K} = \mathbf{k}_b - \mathbf{k}_a \quad (2.13)$$

ขนาดของเวกเตอร์คลื่นเกรตติงสัมพันธ์กับคาบ ( $\Lambda$ ) ของรูปแบบการแทรกสอดของลำแสง

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

ซึ่งเวกเตอร์คลื่นเกรตติงมีค่าสูงสุดเมื่อคลื่นทั้ง 2 มีการโพลาไรซ์ในทิศทางเดียวกันและมีขนาดเท่ากัน คือ  $\mathbf{E}_a = \mathbf{E}_b$  ดังนั้นความเข้มของแสงในกรณีนี้คือ

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

จากสมการแสดงถึงแฉกของแถบการแทรกสอด และแถบมืดเกิดขึ้นที่  $\mathbf{K} \cdot \mathbf{r} = (2m + 1)\pi$  เมื่อความเข้มแสง  $I = 0$

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

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

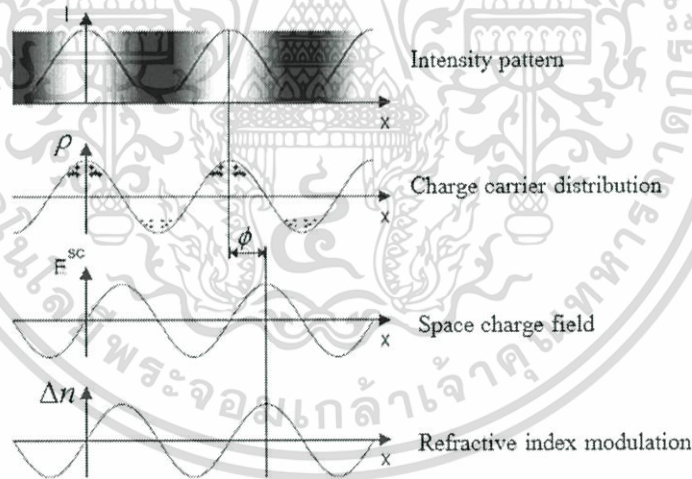
เมื่อ  $\rho_0$  คือค่าคงตัวและทำการอินทิเกรตสมการของปัวส์ซงจากสมการที่ (2.7) จะได้  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เราทราบว่าสนามที่ว่างประจุเฟสถูกเลื่อนไปตำแหน่งที่ว่าง  $\pi/2$  หรือ 90 องศา สัมพันธ์กับความเข้มแสง และสนามที่ว่างประจุนี้ไปเหนี่ยวนำให้ค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลางเปลี่ยนแปลง ตามปรากฏการณ์ของพอคเคิลส์ (Pockel'effect) รูปที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ของความเข้มแสง ความหนาแน่นของที่ว่างประจุ สนามที่ว่างประจุ และการเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหแสงจากการถูกเหนี่ยวนำด้วยที่ว่างประจุเหล่านั้น [1],[9]

สามารถสรุปกระบวนการพื้นฐานในการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรคในผลึกแบบอเล็กโตรออปติกส์ (Electro-optic) ประกอบด้วย 5 กระบวนการ คือ

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



รูปที่ 2.2 แสดงกระบวนการสร้างดัชนีเกรตติงด้วยการแทรกสอดของลำแสงตกกระทบบนตัวกลางที่มีความเข้มแสงแบบเป็นคาบลงบนตัวกลางแบบอเล็กโตรออปติกส์ [10]

ปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรคที่พเป็นปรากฏการณ์ที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าและต้องเกิดประจุพาหะ และการกระจายของประจุพาหะจำนวนมาก โดยปกติความหนาแน่นของประจุพาหะอยู่ในระดับ  $10^{15}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ( $\text{cm}^{-3}$ ) [1]

ใช้ความเข้มการส่องสว่างในสมการที่ (2.10) เพื่อหาค่าสนามที่ว่างประจุในฟังก์ชัน  $\mathbf{r}$  และ  $t$  โดยใช้สมการ (2.4) และ (2.7) ซึ่งสมการคำตอบแบบปิดโดยทั่วไปไม่สามารถใช้ได้สำหรับกรณีนี้ ดังนั้นจึงอธิบายประจุพาหะที่สถานะคงตัว โดยกำหนดให้เวลา ( $t$ ) ในการดิฟเฟอเรนเชียล เท่ากับ 0 จะได้สมการที่สถานะคงตัวตามสมการ (2.4) และ (2.7) [1] คือ

$$sI(N_A - N_D^i) - \gamma_R N N_D^i = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = 0$$

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

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

ใช้สมการเหล่านี้เพื่อหาผลเฉลยของสมการสนามไฟฟ้า ( $\mathbf{E}$ ) ในเทอมของความเข้มแสง  $I(\mathbf{r})$  ดังนั้นสมการคำตอบแบบปิดสามารถใช้ในกรณีที่มีความเข้มแสงในการกระตุ้นประจุพาหะมีค่าน้อยมาก กล่าวคือ  $|I_1| \ll I_0$  จากข้อสมมุติฐานดังกล่าวสามารถละเทอมฮาร์มอนิกอันดับที่สูงกว่าได้ และสามารถเขียนสมการที่สถานะคงตัวได้ [1] ดังนี้

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

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

$$\mathbf{j}(\mathbf{r}) = \mathbf{j}_0 + \text{Re}\{\mathbf{j}_1 e^{-i\mathbf{K}\cdot\mathbf{r}}\} \quad (2.21)$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_0 + \text{Re}\{\mathbf{E}_1 e^{-i\mathbf{K}\cdot\mathbf{r}}\} \quad (2.22)$$

เมื่อ  $N_0, N_{D0}^i, \mathbf{j}_0, \mathbf{E}_0, N_1, N_{D1}^i, \mathbf{j}_1, \mathbf{E}_1$  คือ ค่าคงตัว ปัญหาคือเราต้องแก้สมการสำหรับค่าคงตัวเหล่านี้ในเทอมของ  $I_0$  และ  $I_1$  ดังนั้นจะแก้สมการเพื่อหาปริมาณทางฟิสิกส์เหล่านี้ โดยเริ่มพิจารณาจากกรณี  $I_1$  เท่ากับ 0 ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อส่องสว่างลำแสง 1 ลำแบบสม่ำเสมอ (Uniform illumination) หรือลำแสง 2 ลำด้วยแกนโพลาไรซ์ตั้งฉากกัน ดังนั้นความเข้มแสง  $I_1 = 2\mathbf{E}_b \cdot \mathbf{E}_a^* = 0$  และในกรณีที่ส่องสว่างลำแสงแบบความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงเป็นคาบ (Periodic intensity variation)

กรณีที่ 1 การส่องสว่างแบบสม่ำเสมอ (Uniform illumination :  $I_1 = 0$ ) กรณีนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ของปริมาณทางฟิสิกส์ทั้งหมด ดังนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ของความหนาแน่นประจุพาหะคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

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

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

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

$$N = \frac{N_D - N_A}{\gamma_R N_A} sI \quad (2.26)$$

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

$$N_D^i = N_A + \frac{N_D - N_A}{\gamma_R N_A} sI \quad (2.27)$$

กรณีที่ 2 การส่องสว่างแสงแบบเป็นคาบ (Periodic illumination :  $I_1 \neq 0$ ) พิจารณาในกรณีการส่องสว่างแสงแบบเป็นคาบ ๆ ความเข้มแสง  $I_1 \neq 0$  ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อแสงแบบโคฮีเรนต์ 2 ลำตัดกันภายในตัวกลาง เมื่อแทนสมการ (2.31) ถึง (2.34) และพิจารณาเฉพาะเทอมของฮาร์มอนิกอันดับแรกเท่านั้น จะได้ระบบสมการดังนี้ [1]

$$sI_1(N_D - N_{D0}^i) + sI_0(-N_{D1}^i) - \gamma_R N_1 N_{D0}^i - \gamma_R N_0 N_{D1}^i = 0 \quad (2.28)$$

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

$$\mathbf{K} \cdot (qN_1 \mu \mathbf{E}_0 + qN_0 \mu \mathbf{E}_1 - ik_B T \mu \mathbf{K} N_1) = 0 \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-i\mathbf{K} \cdot \epsilon \mathbf{E}_1 = -q(N_1 - N_{D1}^i) \quad (2.31)$$

$$N_0 + N_A - N_{D0}^i = 0 \quad (2.32)$$

ในสมการเหล่านี้ตัวแปร  $N_A$ ,  $N_D$  และ  $E_0$  คือ ค่าคงตัว ส่วน  $N_0$  และ  $N_{D0}^i$  สามารถหาได้จากการแก้สมการที่ (2.29) และ (2.32) ซึ่งผลที่ได้เหมือนกับในสมการที่ (2.26) และ (2.27) ตามลำดับ ส่วนสมการที่เหลืออีก 3 สมการนำไปใช้หาค่า  $N_1$ ,  $N_{D1}^i$  และ  $E_1$

จากสมการแมกซ์เวลล์ข้อที่ 4 (Curl Maxwell equation) ในกรณีที่อยู่ในสถานะคงตัว  $\nabla \times \mathbf{E} = 0$  ทำให้  $\mathbf{K} \times \mathbf{E}_1 = 0$  หมายความว่า  $\mathbf{E}_1$  เท่ากับ  $\mathbf{K}$  หลังจากหาคำนวณ และประมาณค่าของเทอมพีชคณิตต่าง ๆ ทำให้เราสามารถหาค่าสนามที่วางประจุได้ดังสมการ

$$\mathbf{E}_1 = \frac{i\mathbf{K} \frac{k_B T}{q} - \frac{\mathbf{K} \cdot \mu \mathbf{E}_0}{\mathbf{K}(\mu)}}{1 + \frac{K^2}{k_D^2} + i \frac{q\mathbf{K} \cdot \mu \mathbf{E}_0}{k_B T k_D^2 (\mu)}} \frac{I_1}{I_0} \quad (2.33)$$

เมื่อ

$$k_D^2 = \frac{q^2}{(\epsilon) k_B T} \frac{N_A}{N_D} (N_D - N_A) \quad (2.34)$$

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

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

$$\langle \epsilon \rangle = \frac{\mathbf{K} \cdot \epsilon \mathbf{K}}{K^2} \quad (2.35)$$

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

เมื่อถึงสมการ (2.33) 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 ( $\mathbf{K}$ ) สามารถลดรูปสมการที่ (2.33) ได้เป็น

$$\mathbf{E}_1 = \frac{i\mathbf{K} \frac{k_B T}{q} - \frac{\mathbf{K} \cdot \mathbf{E}_0}{\mathbf{K}}}{1 + \frac{K^2}{k_D^2} + i \frac{q\mathbf{K} \cdot \mathbf{E}_0}{k_B T k_D^2}} \frac{I_1}{I_0} \quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$E_1 = \frac{iK \frac{k_B T}{q} I_1}{1 + \frac{K^2}{k_D^2} I_0} \quad (2.38)$$

สมการทั้งสองใช้สำหรับหาค่าสนามที่ว่างประจุ เป็นสมการที่สำคัญเพื่อหาแบบจำลองการเคลื่อนย้ายประจุระหว่างแถบพลังงาน ซึ่ง  $K$  คือ เวกเตอร์คลื่นเกรตติง ค่า  $k_D$  หาได้จากสมการที่ (2.34) และทราบค่าเลขคลื่นของเดอบาย (Debye wave number) จากทฤษฎีสถานแม่เหล็กไฟฟ้าในพลาสมา อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ออกนอกจากในสนามคูลอมบ์ (Coulomb field) ของประจุทดสอบด้วยระยะทาง  $D = 2\pi/k_D$  ซึ่งระยะทาง คือรัศมีฉากของเดอบายโดยอธิบายด้วยความสมดุลระหว่างพลังงานจลน์ความร้อน กับพลังงานไฟฟ้าสถิตของประจุพาหะเหล่านั้น ในกรณีนี้เมื่อ  $N_D \gg N_A$  ดังนั้นสามารถเขียนสมการ  $k_D$  จาก (2.34) ได้ใหม่เป็น

$$k_D^2 = \frac{q^2 N_A}{(\epsilon) k_B T} = \frac{q^2 N_{D0}}{(\epsilon) k_B T} \quad (2.39)$$

เมื่อ  $N_{D0}$  คือค่าความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้ที่แตกตัวเป็นไอออน ซึ่งประจุที่เป็นบวกสามารถจับกับอิเล็กตรอนได้

### 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

### 2.3.1 ตัวกลางแบบเป็นคาบ

โดยทั่ว ๆ ไปตัวกลางแบบเป็นคาบจะมีโครงสร้างใด ๆ ที่มีค่าคงตัวใดอิเล็กทริก การสะท้อนแบบสมมาตรเป็นฟังก์ชันแบบคาบของตำแหน่ง

$$\epsilon(x) = \epsilon(x + a) \quad (2.40)$$

เมื่อ  $a$  คือเวกเตอร์คงตัว ในกรณีของตัวกลางที่เป็นคาบแบบ 1 มิติ เขียนสมการ (2.40) ได้เป็น

$$\epsilon(z) = \epsilon(z + \Lambda) \quad (2.41)$$

หรือ

$$n^2(z) = n^2(z + \Lambda) \quad (2.42)$$

เมื่อ  $z$  คือตัวชี้วัดตำแหน่ง และ  $\Lambda$  คือคาบ ตามความหมายโดยทั่วไปตัวกลางแบบเป็นคาบหมายถึง เฟสเกรตติง (Phase grating) ซึ่งประกอบด้วยแผ่นกระจกบาง ๆ ที่มีแถวของช่องว่างระยะห่างเท่า ๆ กันขนานกัน เกรตติงสะท้อน (Reflecting grating) ประกอบด้วยผิวโลหะแบนที่มีแถวของช่องว่างระยะห่างเท่ากัน ๆ ขนานกัน ฮอโลแกรมแบบปริมาตร (Volume hologram) ประกอบด้วยตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยดัชนีหักเหแสงถูกเปลี่ยนเป็นคาบ ซึ่งแถวระนาบสามมิติเป็นคาบของอะตอม เช่น ตัวกลางที่เป็นผลึก

วัสดุโฟโตรีแฟรกทีฟสามารถเป็นตัวกลางแบบเป็นคาบได้ด้วยการเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลางแบบเป็นช่วง ๆ ซึ่งทำได้โดยการส่องสว่างแสงด้วยความเข้มแสงที่มีความเป็นโคฮีเรนซ์ลงบนพื้นที่ตัวกลาง ดังนั้นสามารถเขียนค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลางแบบเป็นคาบได้ดังสมการ

$$n(z) = n_0 + n_1 p(z) \quad (2.43)$$

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

$$p(z) = p(z + \Lambda) \quad (2.44)$$

โดย

$$\max\{|p(z)|\} = 1 \quad (2.45)$$

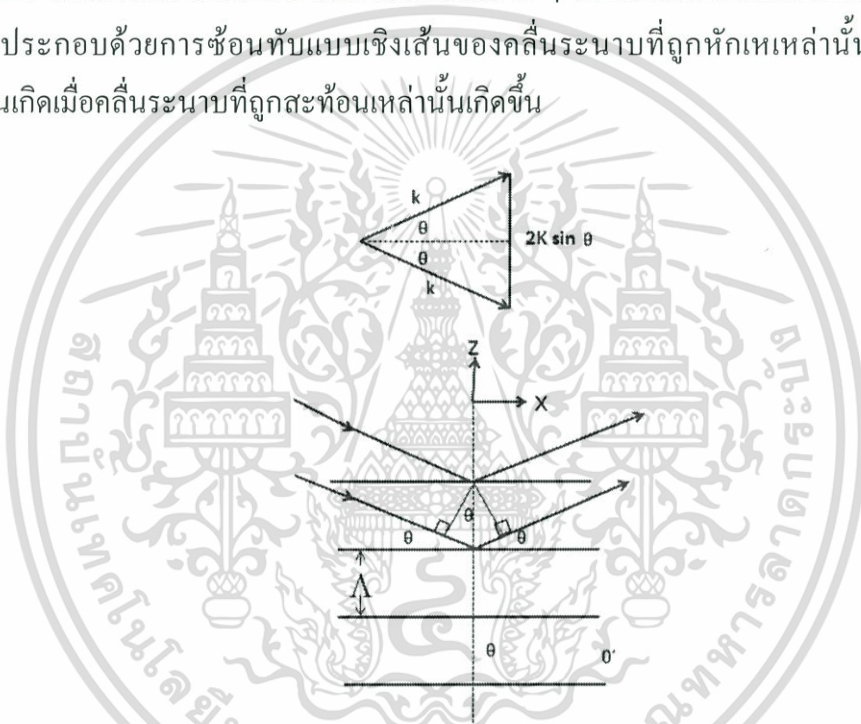
และ

$$\int_0^\Lambda p(z) dz = 0 \quad (2.46)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสมการที่ (2.43) 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 นอกจากนี้เรายังถือว่าระนาบเหล่านี้มีไม่จำกัด หรือมีจำนวนอนันต์ ดังนั้นการหักเหจากระนาบเป็นการสะท้อนเหมือนกับการสะท้อนจากกระจกเงา ที่มีมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน โดยแต่ละระนาบสะท้อนเพียงส่วนน้อยมาก ๆ ของคลื่นระนาบตกกระทบ ซึ่งแสงที่ถูกกระเจิงประกอบด้วยการซ้อนทับแบบเชิงเส้นของคลื่นระนาบที่ถูกหักเหเหล่านั้น ส่วนลำแสงเลี้ยวเบนเกิดเมื่อคลื่นระนาบที่ถูกสะท้อนเหล่านั้นเกิดขึ้น



รูปที่ 2.3 แสดงการกระเจิงของคลื่นระนาบจากแสงเอกรงค์ลงบนตัวกลางแบบเป็นคาบ [1]

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

$$2\Lambda \sin \theta = N(\lambda/n) \quad (2.47)$$

เมื่อ  $n = n_0$  คือดัชนีหักเหแสงเฉลี่ยในที่ว่างของการหักเหแสงในตัวกลาง และ  $N$  คือ จำนวนเต็ม ซึ่งเป็นกฎการเลี้ยวเบนของแบรกก์ (Bragg diffraction) ถึงแม้การสะท้อนของรังสีแต่ละระนาบเป็นเหมือนการสะท้อนจากกระจกเงา แต่ลำแสงเลี้ยวเบนเกิดขึ้นเพียงค่าของมุมที่แน่นอน ( $\theta$ ) ตามหลักการเลี้ยวเบนของแบรกก์ ดังนั้นการสะท้อนจากระนาบทั้งหมดเกิดขึ้นเป็นระยะ จากสมการ (2.47) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$2k \sin \theta = N \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2.48)$$

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

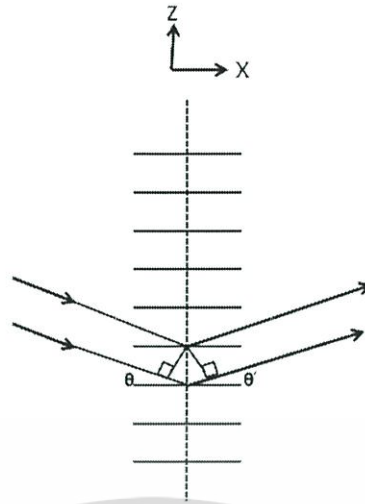
$$K = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2.49)$$

เทอมด้านซ้ายของสมการ (2.60)  $2k \sin \theta$  คือ การเปลี่ยนเวกเตอร์คลื่นเมื่อคลื่นเลี้ยวเบนจากตัวกลางแบบเป็นคาบ ดังนั้นจากหลักการเลี้ยวเบนของแบรกก์ สามารถตีความได้ว่าเป็นเพียงการอนุรักษ์โมเมนตัม เมื่อคลื่นเลี้ยวเบนจากตัวกลางแบบเป็นคาบ (Grating) จะเกิดการเปลี่ยนเวกเตอร์คลื่นคือ การเปลี่ยนจำนวนเต็มของเวกเตอร์คลื่นเกรตติง

ในความเป็นจริง ถ้าแยกฟังก์ชันคาบในสมการ (2.43) ลงในองค์ประกอบของฟูรีเยร์ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$n(z) = n_0 + n_1 \sum_m a_m \exp(-i \frac{2\pi}{\Lambda} mz) \quad (2.50)$$

เมื่อ  $a_m$  คือ องค์ประกอบฟูรีเยร์อันดับที่  $m$  ของการเปลี่ยนดัชนีหักเหแสงแบบเป็นคาบ โดยทราบว่างค์ประกอบฟูรีเยร์อันดับที่  $m$  เป็นเลขคลื่น  $m(2\pi/\Lambda)$  ซึ่งองค์ประกอบแต่ละตัวของฟูรีเยร์กระจายตามอันดับการเลี้ยวเบนของแบรกก์ ในสมการ (2.60) ถึงแม้กฎการเลี้ยวเบนของแบรกก์อธิบายตัวกลางที่มีเกรตติงไม่จำกัด ผลในสมการ (2.47) และ (2.48) ถูกต้องตามขนาดของระนาบการหักเหเหล่านั้น ซึ่งต้องมีค่ามากกว่าขนาดของลำแสง ภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้ตัวกลางแบบเป็นคาบถูกเรียกว่าเกรตติงหนา (Thick grating) หรือเกรตติงปริมาตร (Volume grating)



รูปที่ 2.4 แสดงการเลี้ยวเบนแสงในตัวกลางแบบเป็นคาบจากเกรตติงแบบบาง [1]

จากรูปที่ 2.4 เราพิจารณากรณีของเกรตติงบาง ๆ ซึ่งเกรตติงแบบนี้ขนาดตามขวางของการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหแสงแบบเป็นคาบขนาดค่อนข้างเล็กเมื่อเทียบกับขนาดของลำแสงหรือความยาวคลื่นของแสง เมื่อคลื่นระนาบตกกระทบบนตัวกลางแบบเป็นคาบ การเลี้ยวเบนของคลื่นแต่ละระนาบเกิดขึ้นจากการสะท้อนแบบการสะท้อนจากกระจกเงา ซึ่งการเลี้ยวเบนแสงแต่ละระนาบเหล่านี้เป็นผลมาจากขนาดที่จำกัดของระนาบ เนื่องจากระนาบที่จำกัดนี้ช่วยให้แสงที่กระเจิงถูกบังคับตามมุม  $\theta'$  ซึ่งมีค่าแตกต่างจากมุมตกกระทบบน  $\theta$  การใช้เหตุผลที่คล้ายกันในสมการที่ (2.47) ดังนั้นได้เงื่อนไขสำหรับสร้างการแทรกสอดของคลื่น

$$\Lambda \sin \theta + \Lambda \sin \theta' = N(\lambda/n) \quad (2.51)$$

เมื่อ  $N$  คือ จำนวนเต็ม จากสมการ (2.51) มีชุดของอันดับการเลี้ยวเบนแสงสำหรับมุมใด ๆ ของการตกกระทบบน ซึ่งเป็นความแตกต่างระหว่างเกรตติงแบบบาง (Thin grating) และ เกรตติงแบบหนา (Thick grating) โดยเกรตติงแบบหนามีเพียงการเลี้ยวเบนเพียงอันดับเดียว นอกจากนี้การเลี้ยวเบนเกิดขึ้นเพียงเมื่อมุมตกกระทบบนไปตามกฎของแบรกก์เท่านั้น

### 2.3.2 การเลี้ยวเบนของแบรกก์ในตัวกลางแอนไอโซโทรปิก

การเลี้ยวเบนของแสงด้วยเกรตติงเป็นกระบวนการเกิดอันตรกิริยาระหว่างคลื่นตกกระทบบนและคลื่นเลี้ยวเบน การอนุรักษ์โมเมนตัมต้องเกิดจากเวกเตอร์คลื่นสามตัวที่เกี่ยวข้องกับโฟตอนและเวกเตอร์เกรตติงมีรูปแบบเป็นสามเหลี่ยม ในตัวกลางแบบไอโซโทรปิก (Isotropic media) ค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นเอกลักษณ์สำหรับทุกทิศทางเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับดูที่เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

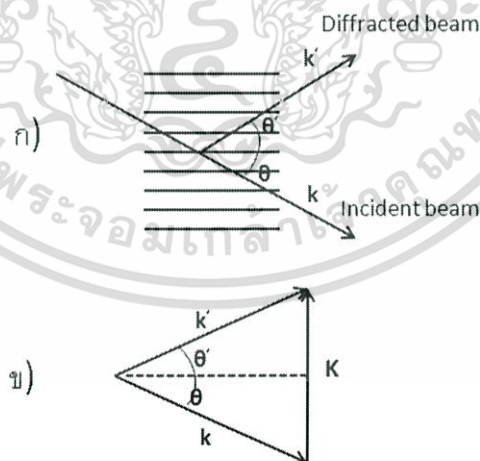
หักเหแสงที่เกี่ยวข้องกับลำแสงมีความเป็นอิสระต่อทิศทางการเดินทางของคลื่นแสง ดังนั้น  $|\mathbf{k}'|$  มีค่าเช่นเดียวกับ  $|\mathbf{k}|$  และเวกเตอร์เกรตติงเป็นแบบสามเหลี่ยมหน้าจั่ว ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขการเลี้ยวเบนของแบรกก์ (Bragg diffraction) [1]

ส่วนในตัวกลางแอนไอโซโทรปิก (Anisotropic media) ดัชนีการหักเหแสงจะเกี่ยวข้องกับลำแสง โดยทั่วไปขึ้นอยู่กับทิศทางการเคลื่อนที่เช่นเดียวกับสถานะการโพลาไรซ์ เนื่องจากลำแสงที่ถูกเลี้ยวเบนโดยทั่วไปเดินทางในทิศที่แตกต่างจากลำแสงตกกระทบ และเวกเตอร์คลื่นเลี้ยวเบนมีค่าน้อยกว่าเวกเตอร์คลื่นของลำแสงตกกระทบ ในบางกรณีถึงแม้จะมีการเปลี่ยนสถานะการโพลาไรซ์ระหว่างลำแสงตกกระทบกับลำแสงเลี้ยวเบน กำหนดให้  $n'$  และ  $n$  คือค่าดัชนีหักเหแสงที่เกี่ยวข้องกับลำแสงเลี้ยวเบนและลำแสงตกกระทบตามลำดับ รูปแบบของสามเหลี่ยมมีด้านเท่ากัน โดย  $\mathbf{k}'$ ,  $\mathbf{k}$  และ  $\mathbf{K}$  ซึ่งค่า  $\mathbf{k}' = n'\omega/c$  และ  $\mathbf{k} = n\omega/c$  เนื่องจาก  $n'$  และ  $n$  ปกติมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นรูปสามเหลี่ยมจึงไม่เป็นสามเหลี่ยมหน้าจั่ว กำหนดให้มุม  $\theta'$  และ  $\theta$  คือมุมระหว่างลำแสงกับหน้าคลื่นของเกรตติงดังแสดงในรูป 2.5 ดังนั้นเงื่อนไขการเลี้ยวเบนของแบรกก์ ได้จากรูปสามเหลี่ยมในรูปที่ 2.5 และสามารถเขียนได้ดังสมการ [1]

$$2k \sin \theta = K - (k'^2 - k^2)/K \quad (2.52)$$

และ

$$2k' \sin \theta' = K + (k'^2 - k^2)/K \quad (2.53)$$



รูปที่ 2.5 แสดงการเลี้ยวเบนของแบรกก์ในตัวกลางแบบแอนไอโซโทรปิก ก) การเลี้ยวเบนของแสงจากเกรตติง ข) กฎการอนุรักษ์โมเมนตัมของเวกเตอร์คลื่น [1]

หรือเมื่อแทน เวกเตอร์คลื่นของลำแสงตกกระทบ  $\mathbf{k} = n\omega/\lambda$  เวกเตอร์คลื่นของลำแสงเลี้ยวเบน  $\mathbf{k}' = n'\omega/\lambda$  และเวกเตอร์คลื่นของเกรตติง  $\mathbf{K} = \omega/\Lambda$  จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$2\Lambda \sin \theta = \frac{\lambda}{n} - \frac{\Lambda^2}{n\lambda} (n'^2 - n^2) \quad (2.54)$$

และ

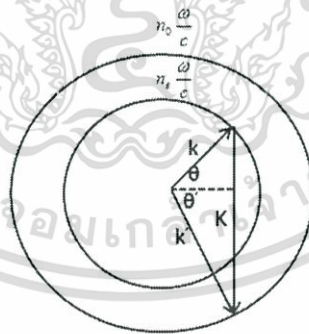
$$2\Lambda \sin \theta' = \frac{\lambda}{n'} + \frac{\Lambda^2}{n'\lambda} (n'^2 - n^2) \quad (2.55)$$

สำหรับ  $n' = n$  จากเงื่อนไขการเลี้ยวเบนของแบรกก์  $2\Lambda \sin \theta = N(\lambda/n)$  เมื่อ  $N$  คือ จำนวนเต็ม กำหนดให้เท่ากับ 1 และเมื่อ  $\theta' = \theta$  เพื่อแสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์แอนไอโซโทรปิก เราพิจารณาในกรณีการเลี้ยวเบนของแบรกก์ในผลึกที่มีแกนเดียว (Uniaxial crystal) เช่น ผลึก  $\text{BaTiO}_3$  โดยสมมุติว่าทั้งการเคลื่อนที่ของลำแสงในระนาบตั้งฉากกับแกนแสงของผลึก (c-axis) ลำแสงตกกระทบมีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นขนานกับแกนแสง เพื่อที่จะเคลื่อนที่ในโหมดวิสามัญ (Extraordinary mode) ของผลึกด้วยดัชนีหักเหแสง  $n_e$  ลำแสงที่ถูกเลี้ยวเบนถือว่าการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นตั้งฉากกับแกนแสง และเคลื่อนที่ในโหมดสามัญ (Ordinary mode) ของผลึกด้วยดัชนีหักเหแสง  $n_o$  ดังแสดงในรูป 2.6 มุมของลำแสงตกกระทบและลำแสงเลี้ยวเบน แสดงในสมการ (2.54) และ (2.55) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\sin \theta = \frac{1}{2n_e} \left[ \frac{\lambda}{\Lambda} - \frac{\Lambda}{\lambda} (n_o^2 - n_e^2) \right] \quad (2.56)$$

และ

$$\sin \theta' = \frac{1}{2n_o} \left[ \frac{\lambda}{\Lambda} + \frac{\Lambda}{\lambda} (n_o^2 - n_e^2) \right] \quad (2.57)$$



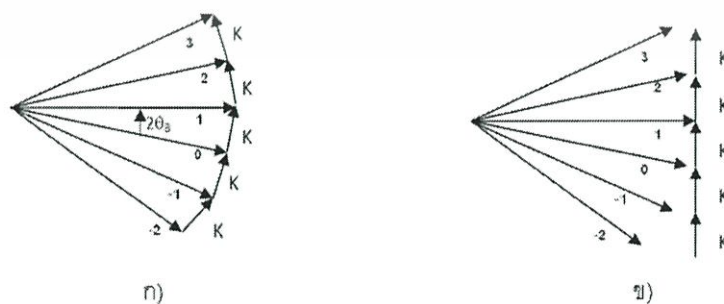
รูปที่ 2.6 แสดงการกระเจิงของแบรกก์ในตัวกลางแอนไอโซโทรปิกบนผลึกที่มีแกนเดียว [1]

ในสมการ (2.56) และ (2.57) มุมของลำแสงตกกระทบ คือ  $\theta$  และมุมของลำแสงเลี้ยวเบน คือ  $\theta'$  เป็นทั้งฟังก์ชันของ  $(\lambda/\Lambda)$  สำหรับผลึกเมื่อ  $n_o$  และ  $n_e$  เป็นค่าคงตัวของผลึก สำหรับฟังก์ชัน  $\lambda/\Lambda = |n_o \pm n_e|$  และ  $|\theta'| = |\theta| = 90^\circ$  และเวกเตอร์  $\mathbf{k}$ ,  $\mathbf{k}'$  และ  $\mathbf{K}$  เป็นเชิงเส้น การเลี้ยวเบนของแบรกก์เป็นไปได้ก็ต่อเมื่อ  $|n_o - n_e| \leq \lambda/\Lambda \leq |n_o + n_e|$  และมุม  $\theta$  และ  $\theta'$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นจริง แต่ถ้าในหลักการการเลี้ยวเบนนี้  $\lambda/\Lambda < |n_o - n_e|$  หรือ  $\lambda/\Lambda > |n_o + n_e|$  และ  $\sin \theta'$  กับ  $\sin \theta$  มีค่ามากกว่า 1 การเลี้ยวเบนไม่เป็นจริงตามกฎการเลี้ยวเบนของแบรกก์

## 2.4 การเลี้ยวเบนของรามาน-เนท

เราได้ศึกษาการเลี้ยวเบนของแสงด้วยเกรตติงที่มีจำนวนอนันต์ ในคลื่นระนาบที่เป็นแสงเอกรงค์หรือแสงความยาวคลื่นเดียว แสดงโดยใช้ควอนตัมในการอธิบายโมเมนตัมและพลังงาน จากกฎการเลี้ยวเบนของแบรกก์ (Bragg diffraction) มองว่าเป็นการสะท้อนของคลื่นเดี่ยวซึ่งเกี่ยวกับการเปลี่ยนโมเมนตัมโดย  $2\pi/\Lambda$  กระบวนการพื้นฐานนี้สามารถเกิดขึ้นได้เพียงเมื่อเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัม เมื่อเกรตติงอยู่กับที่การอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัมต้องมีเวกเตอร์คลื่น ( $\mathbf{K}$ ) ของโฟตอน และรูปแบบเวกเตอร์ดัชนีเกรตติงเป็นรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งเงื่อนไขการเลี้ยวเบนของแบรกก์ คลื่นตกกระทบที่มุมของแบรกก์  $\theta_B = \sin^{-1}(\lambda/2n)$  ถูกเลี้ยวเบนด้วยเกรตติงและเปลี่ยนค่าโมเมนตัม และการเลี้ยวเบนของคลื่นในกรณีที่มีเกรตติงจำนวนอนันต์ ไม่สามารถอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัมในเวลาเดียวกันได้ ดังแสดงในรูป 2.7(ข) เวกเตอร์คลื่นอันดับที่ 0 แสดงคลื่นตกกระทบที่มุมของแบรกก์ ( $\theta_B$ ) ส่วนเวกเตอร์คลื่นอันดับที่ 1 แสดงคลื่นเลี้ยวเบนซึ่งเป็นผลมาจากการกระเจิงแบบเดี่ยวของแบรกก์ และจะมีการกระเจิงอีกครั้งเมื่อมีการเปลี่ยนเวกเตอร์คลื่น  $\mathbf{K}$  เหมือนกัน แต่ไม่สามารถอนุรักษ์โมเมนตัมได้ ดังแสดงในรูป 2.7(ข) ส่วนรูปที่ 2.7(ก) เป็นกระบวนการการเลี้ยวเบนที่ต่อเนื่องกันจำนวนมาก (Multiple scattering) ซึ่งเกรตติงมีเวกเตอร์คลื่นที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ในกรณีนี้สามารถอนุรักษ์ทั้งพลังงานและโมเมนตัม ดังนั้นสรุปได้ว่ากระบวนการกระเจิงแบบต่อเนื่องกันจำนวนมากไม่สามารถเกิดได้ เมื่อเวกเตอร์คลื่นของเกรตติงมีลักษณะแตกต่างกัน เป็นกรณีของเกรตติงที่มีจำนวนอนันต์ ซึ่งกระบวนการกระเจิงแบบต่อเนื่องสามารถเกิดได้เพียงเมื่อมีการกระจายเชิงมุมของเวกเตอร์คลื่นของเกรตติง  $\mathbf{K}$  โดยสอดคล้องกับกรณีที่มีจำนวนเกรตติงที่จำกัด



รูปที่ 2.7 ก) แผนภาพการกระเจิงแบบต่อเนื่องเมื่อเวกเตอร์คลื่นของเกรตติงมีการกระจายเชิงมุม

ข) แผนภาพการกระเจิงแบบต่อเนื่องเมื่อเวกเตอร์คลื่นของเกรตติงมีการกระจายเชิงเส้น [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากหลักการพื้นฐานเราถือว่าตัวกลางเป็นแบบไอโซโทรปิก และ  $\Delta n$  เป็นสเกลาร์ ดังนั้นสมการคลื่นแสงตกกระทบสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp [i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})] \quad (2.62)$$

โดยคลื่นแสงที่ตกกระทบบนแผ่นบาง ๆ ของเกรตติงที่ตำแหน่ง  $x = 0$  ในกฎการเลี้ยวเบนของรามาน-เนท กรณีที่  $Q < 1$  ความยาวในการเกิดอันตรกิริยา  $L$  มีขนาดเล็กพอเพื่อกระทำบนแผ่นเกรตติงที่เป็นคาบ ๆ ( $0 < x < L$ ) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือการส่งผ่านของแสงผ่านบริเวณที่ถูกครอบงวมจะมีผลต่อเฟสของคลื่นระนาบ ดังนั้นคลื่นที่ถูกส่งผ่านสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\mathbf{E}_t = \mathbf{E}_0 \exp [-i\phi + i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})] \quad (2.63)$$

เมื่อ  $\phi$  คือ การเลื่อนเฟส (Phase shift) ซึ่งมีผลจากคลื่นแสงเคลื่อนที่ผ่านเกรตติง สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\phi = \int \frac{\omega}{c} \Delta n ds \quad (2.64)$$

เมื่ออินทิกรัลเส้นทางของรังสีภายในบริเวณ  $0 < x < L$  กำหนดให้  $\theta$  คือ มุมตกกระทบ (มุมระหว่างเวกเตอร์  $\mathbf{k}$  และแกน  $x$ ) และความยาวทางเดินของแสงในบริเวณที่ถูกครอบงวม คือ  $L/\cos \theta$  ถ้าความยาว  $L$  มีค่าเล็กพอ การอินทิกรัลในสมการ (2.64) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\phi = \frac{\omega}{c} n_1 \frac{L}{\cos \theta} \cos (\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}) \quad (2.65)$$

แทนสมการ (2.65) สำหรับค่า  $\phi$  ลงในสมการ (2.63) จะได้

$$\mathbf{E}_t = \mathbf{E}_0 \exp [i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) - i\delta \cos (\mathbf{K} \cdot \mathbf{r})] \quad (2.66)$$

เมื่อกำหนดให้  $\delta$  คือ

$$\delta = \frac{\omega L n_1}{c \cos \theta} = \frac{2\pi L n_1}{\lambda \cos \theta} \quad (2.67)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเรียกว่าดัชนีการมอดูเลต เราทราบว่าสนามไฟฟ้าส่งผ่านในสมการ (2.66) เฟสของคลื่นถูกมอดูเลต โดยการใช้ฟังก์ชันของเบสเซล (Bessel's function)

$$e^{-i\delta \cos x} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(\delta)(-i)^m e^{-imx} \quad (2.68)$$

ดังนั้น สามารถเขียนสนามไฟฟ้าส่งผ่านของคลื่นในสมการ (2.66) ได้ใหม่ดังสมการ

$$\mathbf{E}_t = \mathbf{E}_0 \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(\delta)(-i)^m \exp[i\omega t - i(\mathbf{k} + m\mathbf{K}) \cdot \mathbf{r}] \quad (2.69)$$

จากสมการที่ (2.69) สนามไฟฟ้าส่งผ่านเป็นการซ้อนทับแบบเชิงเส้นของคลื่นระนาบ โดยมีความถี่เชิงมุม  $\omega$  และ เวกเตอร์คลื่น  $(\mathbf{k} + m\mathbf{K})$  ซึ่งเป็นค่าที่ถูกต้องของลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่  $m$

สิ่งสำคัญเราต้องรู้ว่าในสมการ (2.81) สามารถใช้ได้จริงเพียงแค่ว่า  $x = L$  (บริเวณใกล้สนามไฟฟ้า) ส่วนบริเวณที่อยู่ไกลจากสนามไฟฟ้าสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\mathbf{E}_t = \mathbf{E}_0 \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(\delta)(-i)^m \exp[i(\omega t - \mathbf{k}_m \cdot \mathbf{r})] \quad (2.70)$$

เมื่อ  $\mathbf{k}_m$  คือเวกเตอร์คลื่นของลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่  $m$  ซึ่งเวกเตอร์คลื่นสามารถอธิบายโดยใช้สมการดังนี้

$$\mathbf{k}_{mz} = \mathbf{k}_z + m\mathbf{K}_z \quad (2.71)$$

$$\mathbf{k}_{mx} = \left[ \left( \frac{\omega}{c} \right)^2 - \mathbf{k}_{mz}^2 \right]^{1/2} \quad (2.72)$$

เมื่อตัวห้อย  $x$  และ  $z$  เป็นตัวแสดงองค์ประกอบในระนาบ  $x$  และ  $z$  ของเวกเตอร์ที่สอดคล้องกัน สมการที่ (2.71) เป็นจริง เพราะเพียงองค์ประกอบในระนาบ  $z$  ก็สามารถอธิบายได้เป็นอย่างดี ส่วนในสมการที่ (2.72) เป็นผลของการอนุรักษ์พลังงาน แอมพลิจูดของลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่  $m$  คือ  $J_m(\delta)(-i)^m$  ดังแสดงในสมการ (2.81) ประสิทธิภาพของการเลี้ยวเบนสำหรับการเลี้ยวเบนของรามาน-เนทอันดับที่  $m$  สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\eta_m = J_m^2(\delta) = J_m^2 \left( \frac{2\pi L n_1}{\lambda \cos \theta} \right) \quad (2.73)$$

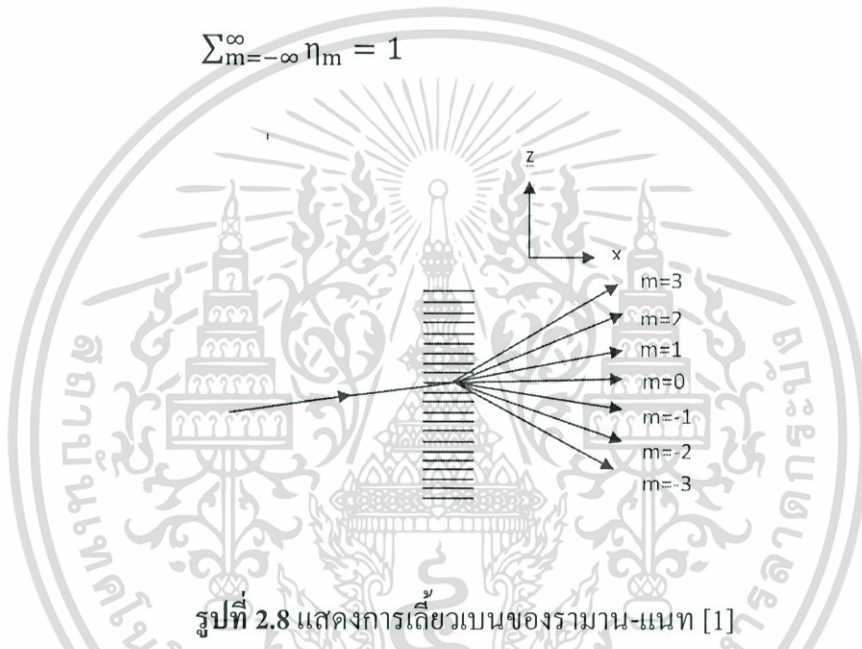
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ไม่มีกรอมอดูเลต ( $n_1 = 0$ ) พลังงานแสงทั้งหมดอยู่ในการเลี้ยวเบนอันดับที่  $m = 0$  ตัวอย่างเช่น  $\eta_0 = 1$  และ  $\eta_0 = 0$  เมื่อ  $m \neq 0$  ประสิทธิภาพการเลี้ยวเบนของการเลี้ยวเบนอันดับที่  $m = \pm 1$  มีค่าสูงสุดเมื่อค่าดัชนีมอดูเลต ( $\delta$ ) เท่ากับ 1.85 และการเลี้ยวเบนอันดับที่ 0 ถูกทำให้หายไปเมื่อค่าดัชนีมอดูเลต ( $\delta$ ) เท่ากับ 2.4 เพราะว่า  $J_0(2.4) = 0$  โดยใช้สัญลักษณ์

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m^2(\delta) = J_0(0) = 1 \quad (2.74)$$

ดังนั้นค่าประสิทธิภาพการเลี้ยวเบนอันดับที่  $m$  เป็นไปตามสมการ

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} \eta_m = 1 \quad (2.75)$$



รูปที่ 2.8 แสดงการเลี้ยวเบนของรามาน-เนท [1]

หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าผลบวกความเข้มแสงของอันดับการเลี้ยวเบนแสงทั้งหมดต้องเท่ากับ ความเข้มแสงของลำแสงตกกระทบ จึงจะเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน รูปที่ 2.8 แสดงการเลี้ยวเบนของแสงหลายอันดับตามกฎการเลี้ยวเบน Raman-Nath

## 2.5 ปรากฏการณ์คลื่นเฟสคอนจูเกต

ปรากฏการณ์หนึ่งที่มีความสำคัญมากสำหรับทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นคือ การเกิดคลื่นเฟสคอนจูเกต (Phase conjugate waves) ถ้าการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกอธิบายด้วยสมการ

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \cos [\omega t - \mathbf{k}z - \phi(z)] \quad (2.76)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ  $E_0$  คือ แอมพลิจูดสนามไฟฟ้าเป็นค่าคงตัว ในหน่วยนิวตันต่อคูลอมบ์ (N/C)  
 $\omega$  คือ ความถี่เชิงมุม ในหน่วยเรเดียนซ์ต่อวินาที (rad/s)  
 $k$  คือ เลขคลื่น ในหน่วยต่อเมตร ( $m^{-1}$ )  
 $\phi$  คือ เฟสของคลื่น ในหน่วยเรเดียนซ์ (rad.)

การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดังกล่าวในตัวกลางสามารถแสดงการเคลื่อนที่ของหน้าคลื่นได้ดังสมการ

$$kz + \phi(z) = k_0 \quad ; \quad k_0 \text{ เป็นค่าคงตัว} \quad (2.77)$$

คลื่นเฟสคอนจูเกตของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสมการที่ (2.76) สามารถเขียนได้เป็น

$$E_c = E_0 \cos [\omega t + kz + \phi(z)] \quad (2.78)$$

เราทราบว่าหน้าคลื่นของ  $E_c$  เหมือนกับหน้าคลื่นของ  $E$  ซึ่งคลื่นทั้งสองเหล่านี้เป็นรูปแบบของคู่คอนจูเกต มีหน้าคลื่นที่เหมือนกัน แต่เคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้าม ในหลักการพื้นฐานคลื่นเฟสคอนจูเกตสามารถสร้างโดยใช้กระจกที่มีผิวหน้าเหมือนกับหน้าคลื่นของคลื่นตกกระทบ เทคนิคนี้เรียกว่าการปรับหน้าคลื่นแสง (Adaptive optics) ซึ่งเราต้องรู้ว่าหน้าคลื่นของรังสีที่ผ่านเข้ามา มีลักษณะแบบไหน การใช้กระจกที่สามารถเปลี่ยนรูปได้ที่ขับเคลื่อนด้วยตัวกระตุ้นทางกล โดยผิวหน้าของกระจกสามารถเปลี่ยนตามลักษณะของหน้าคลื่นที่ผ่านเข้ามา และมีเทคนิคอินเตอร์เฟอโรเมทรี (Interferometry technique) สามารถวัดลักษณะหน้าคลื่นของรังสีที่ผ่านเข้ามา ซึ่งผลที่ได้จากการวัดลักษณะของหน้าคลื่นด้วยวิธีนี้สามารถนำมาใช้เพื่อเตรียมกระจกให้มีลักษณะผิวหน้าเหมือนกับหน้าคลื่นของรังสีตกกระทบ

การทดลองในปี ค.ศ. 1972 พบว่าหน้าคลื่นของรังสีที่ถูกกระเจิงกลับจากการถูกกระตุ้นด้วยการกระเจิงของบริลลูอิน (Stimulated Brillouin scattering : SBS) เป็นแบบจำลองเวลาผันกลับของลำแสงที่กระตุ้นจากลำแสงตกกระทบ โดยยิงรังสีจากเลเซอร์ที่ปรับแบบพัลส์เดียวเข้าไปในเซลล์ SBS เมื่อตรวจสอบรังสีและหน้าคลื่นที่กระเจิงกลับ พบว่ารังสีนั้นมีลักษณะเหมือนกับรังสีตกกระทบ จากการทดลองพบว่าคลื่นเฟสคอนจูเกตใน SBS มีอัตราความเข้มแสงเป็นสองเท่าของคลื่นที่มีเฟสไม่ตรงกัน ดังนั้นสัมประสิทธิ์ความเข้มแสงแบบเอ็กโพเนนเชียลเป็นความแตกต่างอย่างมากกับความเข้มแสงของคลื่นแสงเหล่านั้น และไม่กี่ปีต่อมาผลการทดลองข้างต้นถูกนำเสนอและแสดงให้เห็นว่าปรากฏการณ์การผสมคลื่นแสง 4 ขบวน (Optical four-wave mixing :FWM) สามารถสร้างคลื่นเฟสคอนจูเกตได้ โดย FWM ในทัศนศาสตร์ตัวกลางแบบไม่เชิงเส้นถูกกระตุ้นด้วยคู่ของคลื่นที่เคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้าม เมื่อลำแสงที่ 3 เป็นลำแสงตกกระทบในตัวกลาง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และคลื่นที่ 4 ถูกสร้างขึ้นมีเฟสตรงกับคลื่นของลำแสงตกกระทบ ซึ่งกระบวนการนี้สามารถตีความได้ว่า เป็นฮอโลกราฟีที่เกิดขึ้นพร้อมกัน ในตัวกลางจะมีลำแสงตกกระทบและลำแสงอีกลำหนึ่งที่ถูกกระตุ้น ลักษณะความเข้มแสงที่แทรกสอดกันขึ้นอยู่กับค่าแอมพลิจูดสนามไฟฟ้าของคลื่นทั้งสองในตัวกลางแบบไม่เชิงเส้นบางชนิด สามารถเขียนค่าดัชนีหักเหแสง ดังสมการ[1]

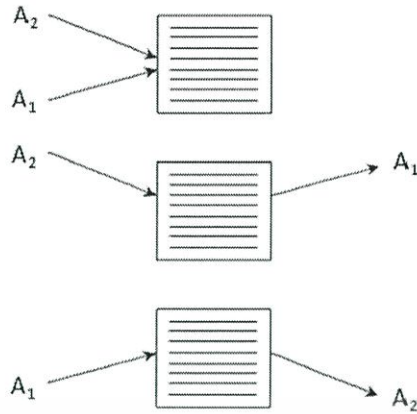
$$n = n_0 + n_2 I \quad (2.79)$$

เมื่อ  $n_0$  ,  $n_2$  คือ ค่าคงตัวในหน่วยตารางเซนติเมตรต่อวัตต์ ( $\text{cm}^2/\text{W}$ ) และ  $I$  คือความเข้มแสงในหน่วยมิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ( $\text{mW}/\text{cm}^2$ ) ซึ่งคงตัว  $n_2$  เป็นที่รู้กันว่าเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของเคอร์ (Kerr coefficient) ในแก้วเชิงแสงมีค่าเท่ากับ  $3.2 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$  เป็นผลเนื่องมาจากการตอบสนองแบบไม่เชิงเส้นของตัวกลาง ทำให้เกิดการสร้างดัชนีเกิดตั้งขึ้น ซึ่งดัชนีเกรตติงที่ถูกสร้างขึ้นนี้เกิดจากลำแสงอื่นที่ถูกกระตุ้น และลำแสงที่หักเหมีเฟสเดียวกันกับลำแสงตกกระทบตัวกลาง

ทั้ง SBS และ FWM เป็นกระบวนการในการเกิดฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 ซึ่งต้องการรังสีที่มีความเข้มแสงมาก ๆ ระดับเมกะวัตต์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ( $\text{MW}/\text{cm}^3$ ) สำหรับการสร้างที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งเทคนิคทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นสำหรับการสร้างคลื่นเฟสคอนจูเกตไม่จำเป็นต้องรู้ลักษณะหน้าคลื่นของรังสีที่ผ่านเข้ามา เนื่องจากการผสมคลื่นแสง 4 ขบวน ในตัวกลางแบบไม่เชิงเส้นจะเหมือนกับฮอโลกราฟีที่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน ซึ่งตัวกลางฮอโลกราฟีสามารถสร้างคลื่นเฟสคอนจูเกตได้ แต่ความเข้มแสงในระดับวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ( $\text{W}/\text{cm}^2$ ) ก็สามารถสร้างการผสมคลื่น 4 ขบวน และคลื่นเฟสคอนจูเกตอย่างมีประสิทธิภาพได้

## 2.6 ปรัชญาการผสมคลื่นในตัวกลางโฟโตรีแฟรกทีฟ

เมื่อลำแสง 2 ลำของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติโคฮีเรนต์ตัดกันภายในตัวกลางโฟโตรีแฟรกทีฟ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงแบบเป็นคาบของความเข้มแสงเนื่องจากการแทรกสอดทำให้เกิดดัชนีเกรตติงแบบหนา (Volume index grating) ภายในตัวกลาง โดยเวกเตอร์คลื่นเกรตติง (Grating wave vector) ได้จาก  $\mathbf{K} = \pm(\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1)$  เมื่อ  $\mathbf{k}_1$  และ  $\mathbf{k}_2$  คือ เวกเตอร์คลื่นของลำแสงที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งการเกิดดัชนีเกรตติงมีผลต่อทิศทางเคลื่อนที่ของลำแสงทั้ง 2 ลำในตัวกลาง ในความเป็นจริงคลื่นแสงเหล่านี้ถูกเลี้ยวเบนด้วยดัชนีเกรตติง จากการกระเจิงของแบรกก์ เมื่อเฟสของคลื่นทั้ง 2 ตรงกันจะทำให้คลื่นทั้งสองสามารถแทรกสอดกันด้วย



รูปที่ 2.9 แสดงการกระเจิงของแบรกก์เนื่องจากเกรตติงแบบหนาในตัวกลางโฟโตรีแฟรกทีฟ [1]

จากรูปที่ 2.9 แสงลำที่ 1 ( $A_1$ ) กระเจิงด้วยดัชนีเกรตติง และเลี้ยวเบนไปตามทิศการเคลื่อนที่ของแสงลำที่ 2 ( $A_2$ ) ส่วนแสงลำที่ 2 ( $A_2$ ) กระเจิงด้วยดัชนีเกรตติงเดียวกัน และสร้างลำแสงเลี้ยวเบนเดินทางไปตามทิศการเคลื่อนที่ของแสงลำที่ 1 ( $A_1$ ) ซึ่งกระบวนการที่เกิดขึ้นนำไปสู่การคับปลิงพลังงาน (Energy coupling) ระหว่างลำแสง และเกิดการกระเจิงการเลี้ยวเบนด้วยตัวเอง (Self-diffraction)

### 2.6.1 ปรัชญาการผสมคลื่น 4 ขบวน

ปรัชญาการผสมคลื่น 4 ขบวน (Four-wave mixing :FWM) เป็นวิธีที่ใช้สำหรับการสร้างคลื่นเฟสคอนจูเกต (Phase conjugate) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในตัวกลางแบบไม่เชิงเส้นถูกกระตุ้นด้วยคู่ของลำแสงเลเซอร์ที่มีทิศการเคลื่อนที่ตรงข้ามกัน เมื่อสัญญาณของลำแสงตกกระทบภายในตัวกลาง ลำแสงที่ 4 จะถูกสร้างขึ้น ซึ่งลำแสงนี้มีทิศทางการเคลื่อนที่ตรงข้ามกับลำแสงตกกระทบ และเป็นแบบผันกลับเวลากับลำแสงตกกระทบ โดยการคับปลิงลำแสงทั้ง 4 ลำนี้ในตัวกลางโฟโตรีแฟรกทีฟ [1],[7]

จากรูปที่ 2.10 เราพิจารณาการแทรกสอดลำแสงทั้ง 4 ลำในตัวกลางโฟโตรีแฟรกทีฟ ซึ่งกำหนดให้ลำแสงทั้งหมดมีความถี่เชิงมุมเหมือนกัน เท่ากับ  $\omega$  สามารถเขียนสนามไฟฟ้าดังสมการ

$$\mathbf{E} = \sum_{j=1}^4 A_j \exp[i(\omega t - \mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r})] \quad (2.80)$$

เมื่อ  $A_1, A_2, A_3, A_4$  คือแอมพลิจูดเชิงซ้อนของคลื่นแสงทั้ง 4 ลำ ในหน่วยนิวตันต่อคูลอมบ์ (N/C)

$\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4$  คือเวกเตอร์คลื่นของลำแสงทั้ง 4 ลำ ในหน่วยต่อเมตร ( $\text{m}^{-1}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสมการที่ (2.80) กำหนดให้ เวกเตอร์คลื่นทั้งหมดอยู่ในระนาบเดียวกัน และคลื่นทั้งหมดมีทิศการโพลาไรซ์ตั้งฉากกับระนาบของคลื่น ในกรณีนี้  $A_3 = A_4 = 0$  ดังนั้นมีคลื่นแสงเพียง 2 ลำ และมีเกรตติงโฟโตรีแฟรกทีฟเพียงตัวเดียว สามารถเขียนสมการทั้ง 2 ได้ ดังนี้

$$\frac{d}{dz} A_1 = -\frac{1}{2} \Gamma(A_1 A_2^*) A_2 / I_0 \quad (2.81)$$

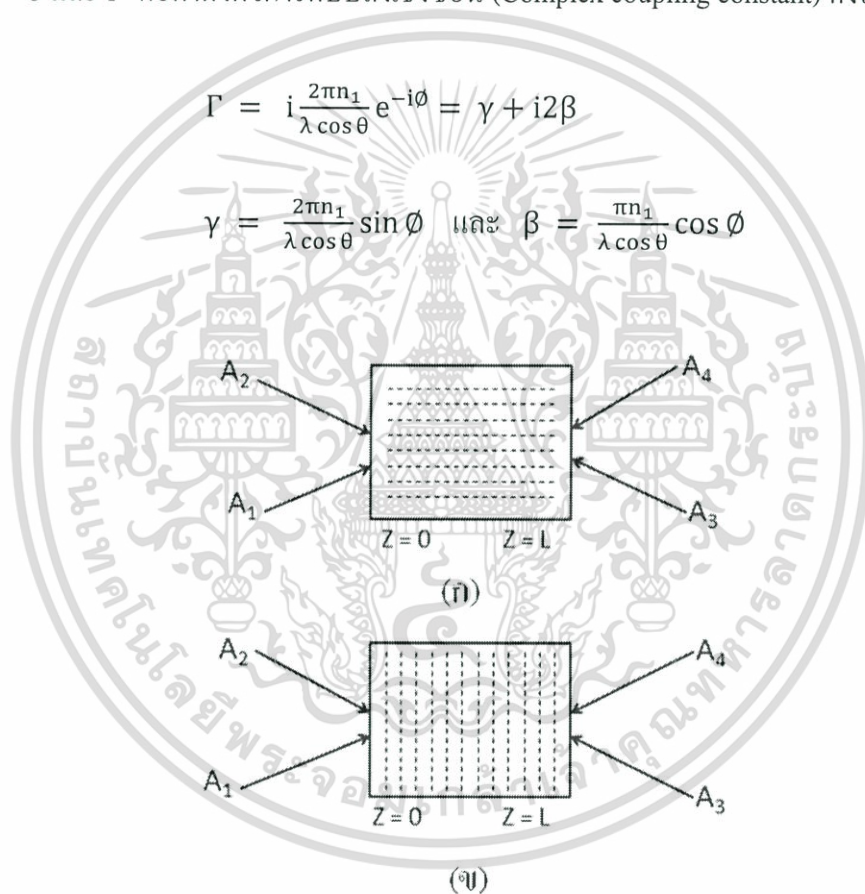
$$\frac{d}{dz} A_2 = -\frac{1}{2} \Gamma(A_1^* A_2) A_1 / I_0 \quad (2.82)$$

เมื่อ  $\alpha = 0$  และ  $\Gamma$  คือค่าคงตัวการคับปลิงเชิงซ้อน (Complex coupling constant) ดังสมการ

$$\Gamma = i \frac{2\pi n_1}{\lambda \cos \theta} e^{-i\phi} = \gamma + i2\beta \quad (2.83)$$

และ

$$\gamma = \frac{2\pi n_1}{\lambda \cos \theta} \sin \phi \quad \text{และ} \quad \beta = \frac{\pi n_1}{\lambda \cos \theta} \cos \phi \quad (2.84)$$



รูปที่ 2.10 แสดงปรากฏการณ์การผสมคลื่น 4 ขบวนในตัวกลางโฟโตรีแฟรกทีฟ [1]

- ก) การผสมคลื่น 4 ขบวน ด้วยเกรตติงแบบส่งผ่าน (Transmission grating) เกรตติงเกิดขึ้นจากคู่ของลำแสง ( $A_1, A_3$ ) หรือ คู่ของลำแสง ( $A_2, A_4$ )
- ข) การผสมคลื่น 4 ขบวน ด้วยเกรตติงแบบสะท้อน (Reflection grating) เกรตติงเกิดขึ้นจากคู่ของลำแสง ( $A_1, A_3$ ) หรือ คู่ของลำแสง ( $A_2, A_4$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสมการที่ (2.81) และ (2.82) เทอมของ  $A_1A_2^*$  แสดงถึงแอมพลิจูดของรูปแบบเกรตติงด้วย  $A_1$  และ  $A_2$  ซึ่งแสดงถึงคลื่นทั้ง 4 โดยทั่วไปมีเกรตติง 6 ตัวในตัวกลาง ในกรณีปรากฏการณ์การผสมคลื่น 4 ขบวน แต่สำหรับคลื่นเฟสคอนจูเกตค่าของเวกเตอร์คลื่นมาจากคู่ของลำแสงที่เดินทางในทิศทางตรงข้ามกัน

$$\mathbf{k}_2 = -\mathbf{k}_3 \text{ และ } \mathbf{k}_4 = -\mathbf{k}_1 \quad (2.85)$$

ถ้าสมมุติว่าคลื่นเหล่านั้นเดินทางเข้าในตัวกลางที่สมมาตรดังแสดงในรูป 2.10 แล้วมีเกรตติงที่แตกต่างกัน 4 ตัว ซึ่งเกรตติงเหล่านี้แสดงโดย  $(A_1A_2^* + A_3A_4^*)$ ,  $(A_2A_4^* + A_1A_3^*)$ ,  $(A_2A_3^*)$  และ  $(A_1A_4^*)$  โดยเทอมแรกเป็นเกรตติงแบบส่งผ่าน (Transmission grating) และเทอมที่สองเป็นเกรตติงแบบสะท้อน (Reflection grating) ส่วนเทอมที่เหลือเป็นเกรตติง  $2\mathbf{k}$  (เกรตติงที่มีเวกเตอร์คลื่น  $2\mathbf{k}$ ) เราจะพิจารณาเพียงเกรตติงแบบส่งผ่าน  $(A_1A_2^* + A_3A_4^*)$  ให้เพิ่มขึ้นตามการแทรกสอดระหว่างลำแสง เรียกว่าการประมาณเกรตติง

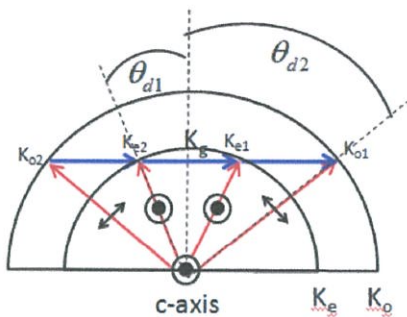
## 2.7 ปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนแบบแอนไอโซโทรปิก

ในผลึกแบบแอนไอโซโทรปิก (Anisotropic crystal) ขนาดใหญ่ เงื่อนไขการเกิดเฟสแมตชิ่ง (Phase matching) จะต้องเป็นไปตามลำแสงตกกระทบ เพื่อสามารถสร้างปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก (Anisotropic self diffraction : ASD) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 แกนแสงของผลึก (c-axis) มีทิศทางขนานกับการโพลาไรซ์ของลำแสงตกกระทบ ขณะที่  $\mathbf{K}_{e1}$  และ  $\mathbf{K}_{e2}$  คือเวกเตอร์คลื่นของลำแสงทั้ง 2 ของการโพลาไรซ์แสงวิสามัญ (Extraordinary light) ส่วน  $\mathbf{K}_{o1}$  และ  $\mathbf{K}_{o2}$  คือเวกเตอร์คลื่นของลำแสงเลี้ยวเบนซึ่งการโพลาไรซ์ตั้งฉากกับแกนแสง หรือการโพลาไรซ์ของแสงสามัญ (Ordinary light) ขณะที่  $\mathbf{K}_g$  คือเวกเตอร์คลื่นเกรตติง สามารถอธิบายได้ดังสมการ [1]

$$\mathbf{K}_g = \mathbf{K}_{e2} - \mathbf{K}_{e1} \quad (2.86)$$

ดังนั้น เวกเตอร์คลื่นของลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่สูงขึ้น สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_{o1} &= \mathbf{K}_{e1} - \mathbf{K}_g \\ \mathbf{K}_{o2} &= \mathbf{K}_{e2} + \mathbf{K}_g \end{aligned} \quad (2.87)$$

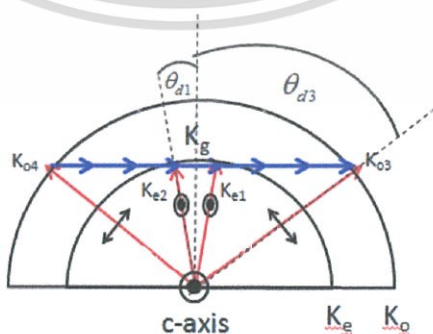


รูปที่ 2.11 แสดงแผนภาพเวกเตอร์คลื่นของแสงเลี้ยวเบนอันดับ 1 และ 2 ของปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก [4]

มุมตกกระทบ และมุมเลี้ยวเบนของแสงทั้งภายในและภายนอกผลึก สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\begin{aligned}
 \theta_{d1} &= \sin^{-1} \left[ \frac{1}{n_e} \left( \frac{n_o^2 - n_e^2}{8} \right)^{1/2} \right] \\
 \theta_{d2} &= \sin^{-1} \left[ \frac{3}{n_e} \left( \frac{n_o^2 - n_e^2}{8} \right)^{1/2} \right] \\
 \theta_{d1o} &= \sin^{-1} \left[ \left( \frac{n_o^2 - n_e^2}{8} \right)^{1/2} \right] \\
 \theta_{d2o} &= \sin^{-1} \left[ 3 \left( \frac{n_o^2 - n_e^2}{8} \right)^{1/2} \right]
 \end{aligned}
 \tag{2.88}$$

เมื่อ  $n_o$  คือ ค่าดัชนีหักเหของแสงสามัญ และ  $n_e$  คือ ค่าดัชนีหักเหของแสงวิสามัญในผลึก นอกจากนี้ภายใต้เงื่อนไขการเลี้ยวเบนของแบรกก์ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 แสงตกกระทบ  $K_{e1}$  และ  $K_{e2}$  ไม่เพียงแต่สร้างเวกเตอร์เกรตติง ( $K_g$ ) แต่ยังคงขับปลิงลำแสงและส่งผ่านพลังงานให้แก่กัน เพื่อสร้างลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 2 ด้วย คือ  $K_{o1}$  และ  $K_{o2}$  ตามลำดับ ซึ่งเป็นหลักการของการเกิดปรากฏการณ์ การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก



รูปที่ 2.12 แสดงแผนภาพเวกเตอร์คลื่นของแสงเลี้ยวเบนอันดับ 1 และ 3 ของปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปเงื่อนไขการเกิดเฟสแมทซิง เป็นการสังเกตการเลี้ยวเบนอันดับที่สูงขึ้นของปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งแสดงเพียงการเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 และอันดับที่ 3 อย่างไรก็ตาม ในกรณีงานวิจัยของเรา ลำแสงที่ถูกเลี้ยวเบนประกอบด้วยทั้งลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 2 ( $K_{o1}$ ,  $K_{o2}$ ) และลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 3 ( $K_{o3}$ ,  $K_{o4}$ ) ซึ่งเกิดขึ้นในเวลาเดียวกันตามเงื่อนไขการเลี้ยวเบนของรามาน-เนท และต้องทราบว่า การเลี้ยวเบนตามเงื่อนไขของรามาน-เนทเป็นอันดับการเลี้ยวเบนแสงที่สูงขึ้นทั้งหมด และลำแสงตกกระทบ มีแกนการโพลาไรซ์เหมือนกัน ซึ่งแตกต่างจากกรณีในการทดลองของเราที่อันดับการเลี้ยวเบนของแสงที่สูงขึ้นมีแกนการโพลาไรซ์ตรงข้ามกับลำแสงตกกระทบ เวกเตอร์คลื่นของการเลี้ยวเบนอันดับที่ 3 สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$K_{o3} = K_{e2} + 3K = K_{e1} + 4K \quad (2.89)$$

โดยทั่วไปปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิกอันดับที่  $M$  จะเกิดในคู่ของ  $M-1$  และ  $M+1$  ดังนั้น เงื่อนไขการเกิดเฟสแมทซิงสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} \sin \theta_{d1} &= \left[ \frac{n_o^2 - n_e^2}{(2M+1)^2 - 1} \right]^{1/2} \\ \sin \theta_{d2} &= (M+1) \left[ \frac{n_o^2 - n_e^2}{(2M+1)^2 - 1} \right]^{1/2} \\ \sin \theta_{d3} &= (2M+1) \left[ \frac{n_o^2 - n_e^2}{(2M+1)^2 - 1} \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (2.90)$$

เมื่อ  $\theta_{d1}$ ,  $\theta_{d2}$  และ  $\theta_{d3}$  คือ มุมเลี้ยวเบนภายนอกผลึกของลำแสงลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 อันดับ 2 อันดับ 3 ตามลำดับ และ  $M$  คือลำดับการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้น ถ้า  $M$  เท่ากับ 1 เกิดลำดับการเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 และอันดับที่ 2 โดยใช้สมการที่ (2.88) ในการคำนวณหามุมเลี้ยวเบนแต่ละอันดับ และ  $M$  เท่ากับ 2 เกิดลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 อันดับ 2 และอันดับที่ 3 พร้อมกัน โดยใช้สมการที่ (2.90) ในการคำนวณหามุมเลี้ยวเบนแต่ละอันดับ

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 ศึกษาคุณสมบัติของผลึก

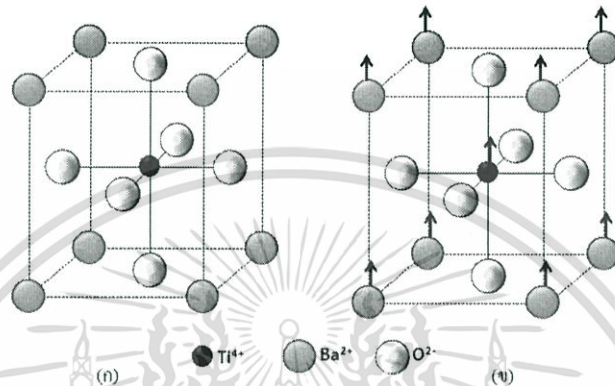
ตัวกลางที่ใช้ในการสร้างลำแสงเลี้ยวเบนของปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก จะต้องเป็นตัวกลางที่มีคุณสมบัติโพโตรีแฟรกทีฟที่ดี ซึ่งเป็นผลึกแบบทัศนศาสตร์ไม่เชิงเส้น และเป็นผลึกที่มีความเป็นอิเล็กโทรออปติกส์ (Electro optic) โดยผลึกที่นำมาใช้ในการทดลองศึกษาลำแสงเลี้ยวเบนของปรากฏการณ์ดังกล่าว คือ ผลึกแบเรียมไททานตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม ( $Ce : BaTiO_3$ )

##### 3.1.1 ผลึกแบเรียมไททานต

ผลึกแบเรียมไททานต ( $BaTiO_3$ ) เป็นหนึ่งในวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric material) ชนิดแรก ๆ ที่ได้ถูกค้นพบ และเป็นวัสดุที่ได้รับการยอมรับว่าเป็นตัวกลางที่มีคุณสมบัติโพโตรีแฟรกทีฟได้เป็นอย่างดี ซึ่งจัดอยู่ในสารประกอบแบบ  $ABO_3$  ที่มีโครงสร้างอยู่ในตระกูลเพอโรฟสไกต์ (Perovskite) [13] ของผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริก โดยสารประกอบชนิดอื่นที่อยู่ในตระกูลนี้เหมือนกัน เช่น  $KNbO_3$ ,  $KTaO_3$ ,  $PbTiO_3$ ,  $LiNbO_3$  และ  $SrTiO_3$  ซึ่งสารประกอบประเภทนี้สามารถเปลี่ยนโครงสร้างได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยอุณหภูมิวิกฤตที่มีผลต่อการเปลี่ยนโครงสร้างผลึก (Curie temperature :  $T_c$ ) ประมาณ 408 เคลวิน หรือ 135 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิถึงเวดล้อมสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตโครงสร้างผลึกเป็นแบบลูกบาศก์ (Cubic) มีความสมมาตร โดยมีไอออน  $Ti^{4+}$  อยู่ที่ตำแหน่งกลางของหน่วยเซลล์ ไอออน  $O^{2-}$  อยู่ที่ผิวหน้าของหน่วยเซลล์ และไอออน  $Ba^{2+}$  อยู่ที่มุมของหน่วยเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1(ก) เมื่อผลึก  $BaTiO_3$  เปลี่ยนเฟส/โครงสร้างเป็นแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) เฟสเฟอร์โรอิเล็กทริกที่อุณหภูมิวิกฤต และเฟสเตตระโกนอลยังคงเสถียรที่อุณหภูมิห้อง แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำมาก ๆ ประมาณ 9 องศาเซลเซียสหน่วยเซลล์จะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นแบบออร์ทอโรมบิก (Orthorhombic) มีจุดกลุ่มแบบ 2mm (จุดกลุ่มสมมาตร 4mm) ที่อุณหภูมิห้องหน่วยเซลล์จะเกิดไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้า (Electric dipole moment) ขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งของไอออน  $Ba^{2+}$  กับ  $Ti^{4+}$  ที่สัมพันธ์กับไอออน  $O^{2-}$  ทำให้โครงสร้างผลึกเกิดความไม่สมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1(ข) [8]

การเปลี่ยนตำแหน่งของไอออนในหน่วยเซลล์ทำให้เกิดการสร้างแกนโพลาริซได้ หรือแกนแสง (c-axis) ของผลึกในทิศทางเคลื่อนที่ของไอออน ที่อุณหภูมิห้องสามารถสังเกตเห็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การอิมตัวของแกนโพลารไรซ์ (P) มีค่าประมาณ  $8 \times 10^{14}$  esu cm<sup>2</sup> ซึ่งคุณสมบัติที่ทราบกันดีในสารประกอบแบบเพอโรฟสไกต์ เช่น การเกิดปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect) และการเกิดฮาร์มอนิกอันดับที่สองจากข้อที่เกิดขึ้นเองในผลึก BaTiO<sub>3</sub> โดยที่การโพลารไรซ์ที่สร้างขึ้นอาจจะมีทิศทางตามแกนของลูกบาศก์ในผลึกที่ถูกสร้างขึ้น <001> ซึ่งผลึก BaTiO<sub>3</sub> มีเฟส/โครงสร้างแบบเตตระโกนอล [8]



รูปที่ 3.1 ก) โครงสร้างผลึกแบเรียมไททานेट เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต  
ข) โครงสร้างผลึกแบเรียมไททานेट เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต [8]

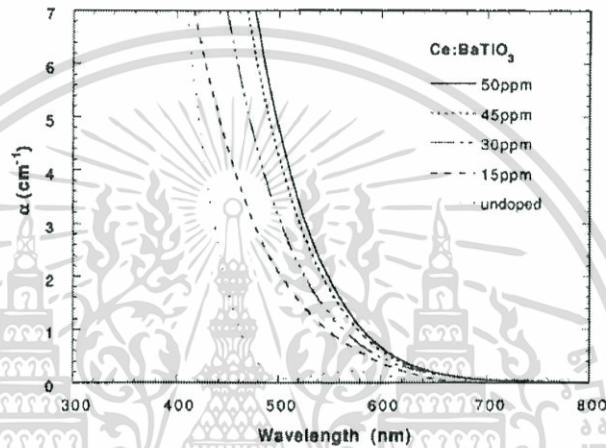
เพราะว่าองค์ประกอบเทนเซอร์อิเล็กโทรอปติกส์ (Electro optic tensor :  $r_{42}$ ) ของ BaTiO<sub>3</sub> มีค่าโตมาก ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพเกรตติง (Grating efficiency) มีค่าสูง อัตราขยายการคับปลิงลำแสง (Beam coupling gain) ที่มีประสิทธิภาพ และเพิ่มอัตราการเกิดการผสมคลื่น 4 ขบวน หรือ การสร้างคลื่นเฟสคอนจูเกต ซึ่งผลึก BaTiO<sub>3</sub> มีคุณสมบัติเฉพาะสำหรับการประยุกต์ใช้ด้านการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรคทีฟ ดังตัวอย่างที่ Feinberg et.al ได้สังเกตการสะท้อนกลับของการเกิดการผสมคลื่น 4 ขบวนซึ่งมีค่าสูงประมาณ 20 ในผลึก BaTiO<sub>3</sub> โดยไม่ต้องจ่ายสนามไฟฟ้าให้กับผลึก ซึ่งการสะท้อนกลับที่มีค่าสูงของการเกิดปรากฏการณ์การผสมคลื่นนี้เป็นสิ่งที่ดีสำหรับการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกต

### 3.1.2 ผลึกแบเรียมไททานेटชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม

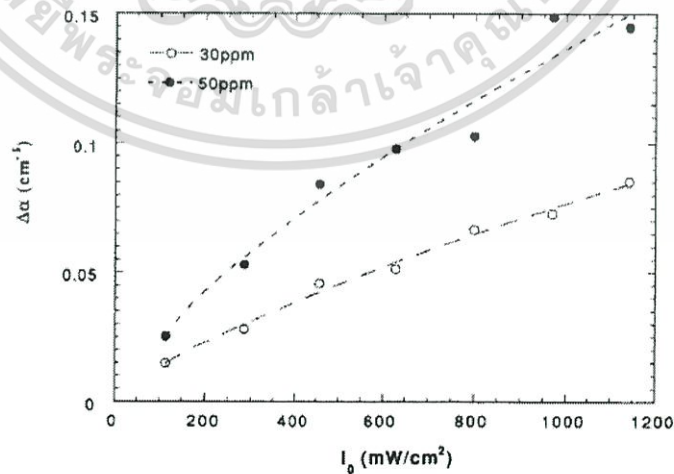
ผลึกแบเรียมไททานेटที่ไม่ได้เจือด้วยอะตอมของสารเจือเป็นวัสดุโฟโตรีแฟรคทีฟที่ตอบสนองต่อสเปกตรัมแสงในช่วงความยาวคลื่นสีเขียวได้ดีที่สุดเพราะระดับพลังงานของผู้ให้ (Donor) อยู่เหนือแถบวาเลนซ์ประมาณ 2.4 อิเล็กตรอน โวลต์ ดังนั้นจึงต้องเติมสารเจือซึ่งใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานในการกระตุ้นต่ำ ๆ เพื่อขยายช่วงการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงที่กว้างขึ้น จึงมีการทดลองเจืออะตอมสารเจือหลายชนิดลงในสารประกอบ  $\text{BaTiO}_3$  เช่น Fe, Co, Ce, และ Rh ถึงแม้ผลึก  $\text{BaTiO}_3$  ชนิดเจือด้วย Fe ไม่มีความสำคัญต่อการพัฒนาประสิทธิภาพของผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟ แต่สามารถเพิ่มความเป็นวัสดุโฟโตรีแฟรกทีฟของผลึก  $\text{BaTiO}_3$  ในการตอบสนองต่อช่วงความยาวคลื่นแสงสีแดงและอินฟราเรด โดยการเจือด้วยอะตอมโรเดียม (Rh) และการเจือด้วยอะตอมโคบอลต์ (Co) ผลึกจะมีความเป็นวัสดุโฟโตรีแฟรกทีฟ และสามารถตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรดระยะใกล้ ส่วนสารเจืออื่นที่ได้รับความนิยมมาก คือ อะตอมซีเรียม (Ce)



รูปที่ 3.2 แสดงกราฟการดูดกลืนแสงของผลึกแบเรียมไททานเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียมที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ [5]



รูปที่ 3.3 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ถูกเหนี่ยวนำของผลึกแบเรียมไททานเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม กับความเข้มแสงโดยใช้แสงความยาวคลื่น 514 นาโนเมตร [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้แบบจำลองกับดักอิเล็กตรอนแบบลึกและตื้น (Deep-and shallow-trap model) ซึ่ง Yang et al. ใช้อธิบายการดูดกลืนแสงและคุณสมบัติเด่นของโฟโตรีแฟรคทีฟในผลึกแบเรียมไททานาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยแสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ( $\alpha$ ) กับฟังก์ชันของความยาวคลื่นแสง ( $\lambda$ ) สำหรับผลึกแบเรียมไททานาเนตที่เจือด้วยอะตอมซีเรียมที่มีความเข้มข้นของการเจือแตกต่างกัน 4 ค่า และผลึกแบเรียมไททานาเนตชนิดไม่เจือด้วยอะตอมของสารเจือ และพลอตกราฟผลของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ถูกเหนี่ยวนำ ( $\Delta\alpha$ ) สำหรับผลึกตัวอย่างที่มีโครงสร้างแบบลูกบาศก์ ดังแสดงในรูป 3.3 ซึ่งค่า ( $\Delta\alpha$ ) จากกราฟเป็นไปตามทฤษฎีในสมการ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอะตอมซีเรียมค่าสัมประสิทธิ์อเล็กโตรอปติกส์ และอัตราการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น การคับปลิงแสงมากขึ้น และการเหนี่ยวนำแสงเข้าใกล้ความเป็นเชิงเส้นมาก

**หมายเหตุ :** ช่วงการใช้งานของผลึกอยู่ระหว่างอุณหภูมิ 9 องศาเซลเซียส ถึง 135 องศาเซลเซียส

เพื่อป้องกันการเปลี่ยนเฟสของผลึกเมื่อคลื่นแสงตกกระทบตัวกลาง และทำการขีดผิวหน้าผลึกในลักษณะต่าง ๆ เพื่อการใช้งานตามความเหมาะสม เช่น

- ขีดผิวหน้าผลึก 1 ด้าน เพื่อใช้สร้างกระจกในการกระตุ้นสร้างคลื่นเฟสคอนจูเกต (Self Pumped Phase Conjugate : SPPC)
- ขีดผิวหน้าผลึก 2 ด้าน เพื่อใช้สร้างการผสมคลื่น 2 ขบวน (Two wave mixing)
- ขีดผิวหน้าผลึกทั้ง 6 ด้าน เพื่อใช้กระตุ้นในการสร้างคลื่นเฟสคอนจูเกต (Self Pumped Phase Conjugate : SPPC)
- ขนาดมาตรฐานของผลึกที่นิยมนำมาใช้ เช่น 5 x 5 x 5 มิลลิเมตร หรือ 5 x 5 x 2 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของผลึกแบเรียมไททานेट [14]

โครงสร้างผลึก (Crystal structure)	tetragonal 4 m			
	$9\text{ }^{\circ}\text{C} (48.2\text{ }^{\circ}\text{F}) < T < 135\text{ }^{\circ}\text{C} (275\text{ }^{\circ}\text{F})$			
	$a = 3.99\text{ \AA}, c = 4.04\text{ \AA} \text{ (at } 26\text{ }^{\circ}\text{C)}$			
วิธีการปลูกผลึก (Growth method)	TSSG (Top seeded solution growth)			
จุดหลอมเหลว (Melting point)	1625 $^{\circ}\text{C}$			
ความหนาแน่น (Density)	6.06 g/cm <sup>3</sup> ที่อุณหภูมิ 26 $^{\circ}\text{C}$			
ความแข็ง (Hardness)	Mohs 5			
ช่องว่างพลังงาน (Bandgap)	3.2 eV ที่อุณหภูมิ 300 K ผลึกเดี่ยว			
ช่วงการส่งผ่าน (Transmission range)	0.43 – 6.30 $\mu\text{m}$			
ดัชนีหักเหแสง (Refractive indices)	$\lambda$ (nm)	515	633	800
	$n_o$	2.4912	2.4160	2.3681
	$n_e$	2.4247	2.3630	2.3235
ค่าสัมประสิทธิ์หรือเล็กโทรออปติกส์ (Electro optic coefficients)	$r_{13}^T = 8.0 \pm 2.0\text{ pm/v}$			
	$r_{33}^T = 105 \pm 10\text{ pm/v}$			
	$r_{42}^T = 1300 \pm 100\text{ pm/v}$			
คุณสมบัติโฟโตรีเฟรกทีฟ (Photorefractive properties)	Reflectivity of SPPC ( $0^{\circ}$ - cut)			
	Ce: BaTiO <sub>3</sub>	50 – 70% สำหรับ $\lambda = 515\text{ nm}$		
	Pure BaTiO <sub>3</sub>	40 – 60% สำหรับ $\lambda = 515\text{ nm}$		
	Ce: BaTiO <sub>3</sub>	50 – 80% สำหรับ $\lambda = 633\text{ nm}$		
Pure BaTiO <sub>3</sub>	40 – 60% สำหรับ $\lambda = 633\text{ nm}$			
ค่าคงตัวการผสมคลื่น 2 ขบวน	10 – 40 cm <sup>-1</sup>			
การดูดกลืนแสง (Absorption loss)	$\lambda$ (nm)	515	633	800
	$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	0.285	0.108	0.033
ช่วงความยาวคลื่นแสงในการตอบสนองของผลึก (Wavelength range of photo refractive effect)	Undoped BTO : visible light Ce : BTO : 480-780 nm Rh : BTO : 720-1060 nm			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 ขั้นตอนการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก

ในงานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาลำแสงเลี้ยวเบนอันดับสูงจากปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก (Anisotropic self diffraction : ASD) ในผลึกแบเรียมไททานเตชไนต์เจือด้วยอะตอมซีเรียม ( $\text{Ce} : \text{BaTiO}_3$ ) ซึ่งเป็นผลึกที่มีคุณสมบัติโพโตรีแฟรกทีฟ และเป็นผลึกแบบทศนศาสตร์ไม่เชิงเส้น โดยใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน (He-Ne laser) เป็นแหล่งกำเนิดแสงสีแดง มีความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร และมีกำลังแสง 10 มิลลิวัตต์ และ 25 มิลลิวัตต์

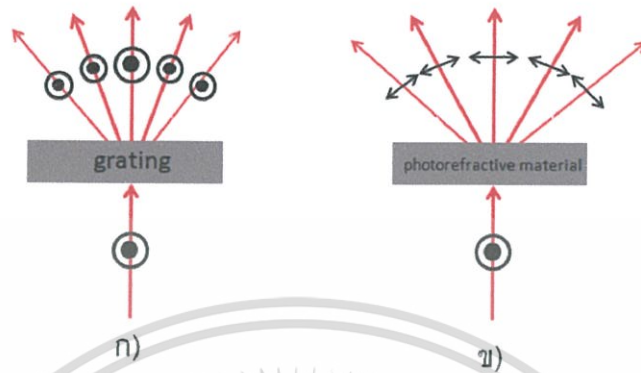
ลำแสงเลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีคุณสมบัติโคฮีเรนต์ (Coherent light) คือ มีความยาวคลื่นเดียว มีเฟสเดียวกัน มีทิศทางที่แน่นอน และมีความเข้มแสงสูง โดยปกติเมื่อส่องสว่างลำแสงแบบโคฮีเรนต์เพียง 1 ลำตกกระทบลงบนแผ่นเกรตติง แสงจะเกิดการเลี้ยวเบนผ่านช่องสลิตของเกรตติงเนื่องจากขนาดของช่องสลิตเล็กกว่าความยาวคลื่นของแสง เกิดเป็นลำแสงเลี้ยวเบนซึ่งเป็นการเลี้ยวเบนแบบปกติ (General diffraction) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เป็นการยิงลำแสงเลเซอร์สีแดงและสีเขียวผ่านแผ่นเกรตติงเลี้ยวเบน ซึ่งจะเห็นได้ว่าลำแสงจะเกิดการเลี้ยวเบนผ่านช่องสลิตของแผ่นเกรตติง โดยลำแสงเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นจะมีจำนวนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความกว้างของช่องสลิตของเกรตติงและค่าความยาวคลื่นของแสง ( $\lambda$ ) ตกกระทบ



รูปที่ 3.4 แสดงการเลี้ยวเบนแสงแบบทั่วไปผ่านแผ่นเกรตติงเลี้ยวเบน จากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์สีแดง และแสงสีเขียว [11-12]

ซึ่งจากผลการเลี้ยวเบนของแสงเลเซอร์ 1 ลำผ่านเกรตติงเลี้ยวเบน ลำแสงเลี้ยวเบนจะมีแกนการโพลาไรซ์เหมือนกับแกนโพลาไรซ์ของลำแสงตกกระทบ แต่ความเข้มของแสงเลี้ยวเบนตำแหน่งกลาง ( $m = 0$ ) มีค่ามากกว่าความเข้มแสงเลี้ยวเบนอันดับที่สูงขึ้น ( $m = 1, 2, 3, \dots$ ) หรือค่าความเข้มเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของลำแสงเลี้ยวเบนจะลดลงเมื่อแสงเลี้ยวเบนออกจากตำแหน่งกลางของแสงตกกระทบบากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.5(ก)

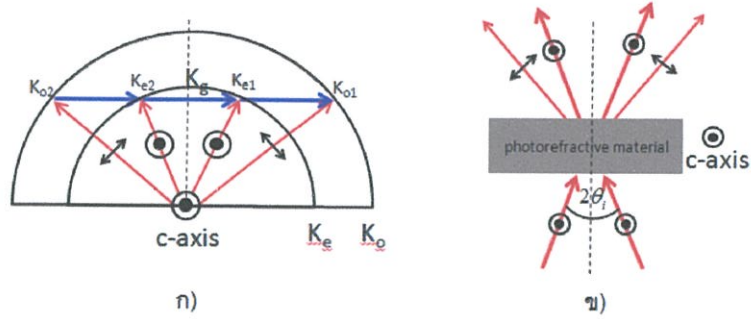


รูปที่ 3.5 แสดงการโพลาไรซ์ของลำแสงตกกระทบบ เปรียบเทียบกับลำแสงเลี้ยวเบน เมื่อลำแสงเลเซอร์ตกกระทบบัวกลางเพียง 1 ลำ

- ก) การโพลาไรซ์ของแสงเลเซอร์เมื่อตกกระทบบัณฑ์เกรตติงเลี้ยวเบน  
ข) การโพลาไรซ์ของแสงเลเซอร์เมื่อตกกระทบบัณฑ์โฟโตรีแฟรกทีฟ

ส่วนภาพการเลี้ยวเบนของแสงในรูปที่ 3.5(ข) เป็นการเลี้ยวเบนของแสงเลเซอร์ 1 ลำตกกระทบบัณฑ์โฟโตรีแฟรกทีฟ (Photorefractive material) ซึ่งเป็นวัสดุแบบทัศนศาสตร์ไม่เชิงเส้น (Nonlinear optic) ลำแสงจะทำให้เกิดการสร้างเกรตติงขึ้นภายในตัวกลางดังกล่าว ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของแสงผ่านตัวกลางและเลี้ยวเบนออกจากแนวของลำแสงตกกระทบบ ซึ่งจากภาพจะเห็นได้ว่าการโพลาไรซ์ของลำแสงตกกระทบบัณฑ์เลี้ยวเบนมีทิศทางตั้งฉากกัน เรียกการเลี้ยวเบนแบบนี้ว่าการเลี้ยวเบนแบบแอนไอโซโทรปิก (Anisotropic diffraction) หรือเป็นการเลี้ยวเบนที่ทิศทางการโพลาไรซ์ของแสงเลี้ยวเบนแตกต่างกับการโพลาไรซ์ของแสงตกกระทบบ แต่เมื่อใช้ลำแสงแบบโคฮีเรนต์ 2 ลำ ซึ่งมีค่าความเข้มแสง เฟสและความยาวคลื่นเดียวกัน ตกกระทบบัณฑ์และเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีคุณสมบัติแบบโฟโตรีแฟรกทีฟแล้วสามารถสร้างเกรตติงขึ้นภายในตัวกลาง และเกิดการเลี้ยวเบนของแสงจากแนวเดิมของแสงตกกระทบบ เรียกว่าการเลี้ยวเบนด้วยตัวเอง (Self diffraction) และตัวกลางที่กล่าวมานั้นไม่เพียงแต่มีคุณสมบัติโฟโตรีแฟรกทีฟที่สามารถสร้างเกรตติงได้อย่างเดียว แต่ทำให้ค่าดัชนีหักเหแสง ( $n$ ) แต่ละแกนของตัวกลางมีค่าไม่เท่ากันด้วยเมื่อมีแสงตกกระทบบัณฑ์ และเมื่อลำแสง 2 ลำที่ตกกระทบบัณฑ์มีมุมตกกระทบบัณฑ์ของลำแสงทั้ง 2 เป็นไปตามเงื่อนไขการเลี้ยวเบนของแบรกก์ (Bragg condition) จะทำให้เวกเตอร์คลื่นของลำแสงที่เลี้ยวเบนมีขนาดเป็นจำนวนเท่าของเวกเตอร์คลื่นตกกระทบบัณฑ์ นอกจากนี้ทิศทางการโพลาไรซ์ของลำแสงเลี้ยวเบนมีทิศตั้งฉากกับลำแสงตกกระทบบัณฑ์ ซึ่งเรียกปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนแบบนี้ว่าการเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก (Anisotropic self diffraction) ดังแสดงในรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แสดงแผนภาพการเกิดปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก

ก) การเลี้ยวเบนของแสงตามเงื่อนไขการเลี้ยวเบนของแบรกก์

ข) การเลี้ยวเบนของแสงผ่านวัสดุโฟโตรีแฟรกทีฟ

### 3.3 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

สำหรับการทดลองเพื่อศึกษาการเกิดปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิกในผลึกแบเรียมไททานเตชไนต์เจ็ดด้วยอะตอมซีเรียม จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ทางแสงที่มีความละเอียดพอสมควร และในการติดตั้งชุดการทดลองต้องติดตั้งบนโต๊ะทดลองทางแสง (Isolate table) เพื่อลดการสั่นของระบบที่เกิดจากการรบกวนจากสิ่งแวดล้อม เพราะระบบการทดลองทางแสงต้องการความนิ่ง ห้ามมีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นระหว่างทำการทดลอง และสิ่งสำคัญห้องปฏิบัติการทางแสงต้องเป็นห้องมืด เพื่อสามารถสังเกตลำแสงเลเซอร์ และลำแสงเลี้ยวเบนได้อย่างชัดเจน ไม่มีแสงรบกวนจากภายนอก ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลองมีดังต่อไปนี้

#### 3.3.1 อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาลำแสงเลี้ยวเบนอันดับสูง (อันดับที่ 2 และ อันดับที่ 3) ของปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก ในผลึกแบเรียมไททานเตชไนต์เจ็ดด้วยอะตอมซีเรียม ประกอบด้วย

1. ผลึกแบเรียมไททานเตชไนต์เจ็ดด้วยอะตอมซีเรียม ( $\text{Ce} : \text{BaTiO}_3$ ) มีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาด กว้าง 6 มิลลิเมตร ยาว 6 มิลลิเมตร และ สูง 6.5 มิลลิเมตร ( $a \times b \times c$ ) ตามลำดับ ซึ่ง ความสูง  $c$  เป็นแกนแสงของผลึก ( $c$ -axis)

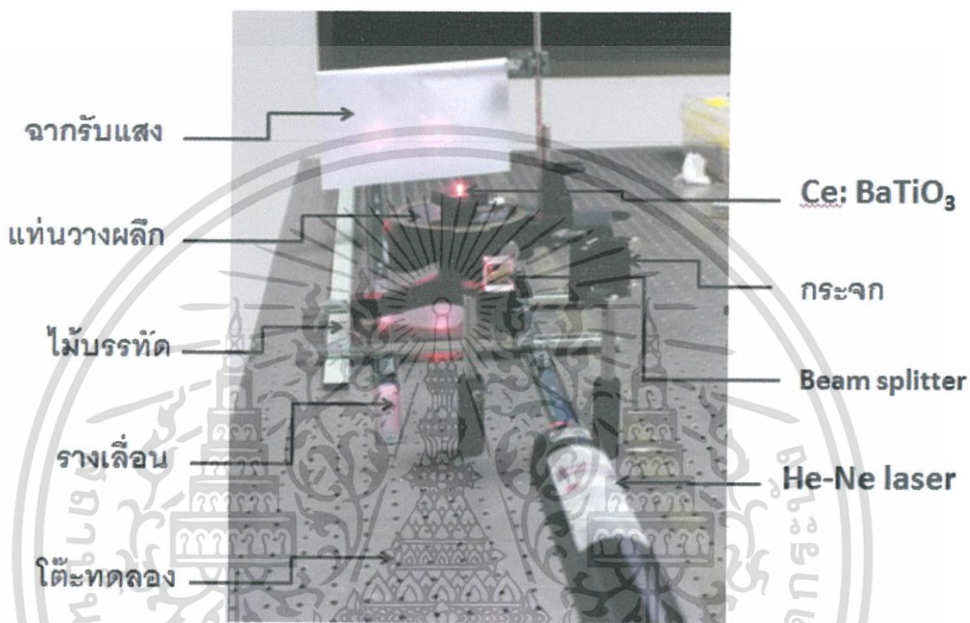
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร กำลังแสง 10 มิลลิวัตต์ และ 25 มิลลิวัตต์ ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแสงสีแดง
3. ตัวแยกลำแสง (Beam splitter) มีลักษณะเป็นลูกบาศก์ ขนาด กว้าง 2.5 เซนติเมตร ยาว 2.5 เซนติเมตร และสูง 2.5 เซนติเมตร ทำหน้าที่เป็นตัวแยกแสงเลเซอร์ ออกเป็น 2 ลำ คือแสงลำที่ 1 และลำที่ 2 ที่มีความเข้มแสงเท่ากัน แต่ความเข้มแสงที่ถูกแยกจะลดลงครึ่งหนึ่งของแสงจากเลเซอร์
4. กระจก (Mirror) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว คอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 750 นาโนเมตร ทำหน้าที่สะท้อนแสงลำที่ 2 ที่หักเหจากตัวแยกแสง เพื่อให้ลำแสงตกกระทบและซ้อนทับกับแสงลำแรกที่ผ่านมาจากตัวแยกแสง ลงบนผิวหน้าผลึกพอดี
5. ฉากรับแสง (Scene) ใช้กระดาษสีขาว ทำหน้าที่รับลำแสงเลี้ยวเบนจากผลึก เพื่อให้สามารถสังเกตภาพ และสามารถบันทึกภาพได้ชัดเจน
6. รางเลื่อน (Linear guide) ทำจากอลูมิเนียม ซึ่งสามารถเลื่อนในระนาบแกน x ได้ 15 เซนติเมตร และในระนาบแกน y ได้ 100 เซนติเมตร ทำหน้าที่เลื่อนผลึกเพื่อให้สามารถปรับมุมตกกระทบแสงเลเซอร์ที่ผิวหน้าของผลึกได้ ในการหามุมตกกระทบ และสังเกตเห็นลำแสงเลี้ยวเบนมีความเข้มมากที่สุด
7. แท่นวางผลึก (Stage) สูงประมาณ 15 เซนติเมตร จากพื้นโต๊ะทดลอง
8. มิเตอร์วัดความเข้มแสงเลเซอร์ (Power meter) ใช้วัดความเข้มแสงของลำแสงตกกระทบและลำแสงเลี้ยวเบนอันดับต่าง ๆ
9. แผ่นโพลาไรเซอร์ (Polarizer) 1 แผ่น เพื่อใช้ตรวจสอบแกนการโพลาไรซ์ของแสงตกกระทบ และการโพลาไรซ์ของลำแสงเลี้ยวเบนอันดับต่าง ๆ
10. แวนกันแสงเลเซอร์ เพื่อป้องกันแสงเลเซอร์เข้าตาระหว่างทำการทดลอง
11. กล้องถ่ายภาพ (CCD) ใช้บันทึกภาพลำแสงเลี้ยวเบนของแสง
12. อุปกรณ์อื่น ๆ เช่น ชุดหกละเอียด ชุดทำความสะอาดเลนส์ ไฟฉาย

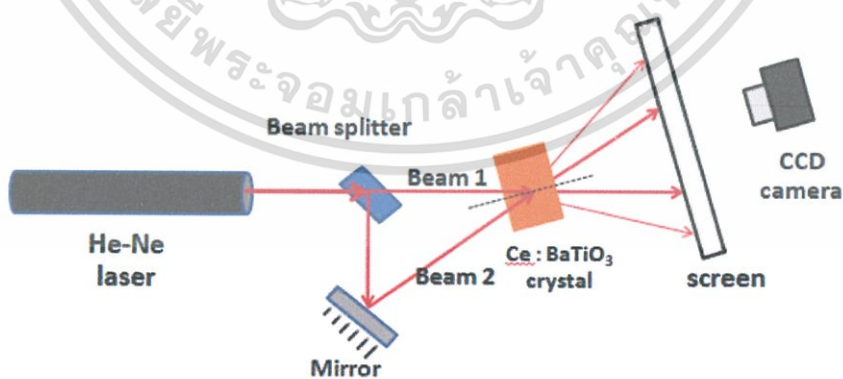
### 3.3.2 การจัดระบบการทดลอง

การจัดชุดอุปกรณ์การทดลองแสดงในรูปที่ 3.7 และแผนภาพการจัดอุปกรณ์ในรูปที่ 3.8 โดยใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน (He-Ne laser) มีความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร เป็นแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งลำแสงจากเลเซอร์ (Light source) ถูกแยกเป็น 2 ลำที่มีแกนโพลาไรซ์เหมือนกับลำแสงเดิม โดยแสงลำที่ 1 ผ่านตัวแยกแสงไปตกกระทบที่ผิวหน้าของผลึกแบเรียมไททานเตชชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม และแสงลำที่ 2 หักเหออกจากตัวแยกแสงไปตกกระทบบนกระจก ซึ่งต้องหมุนตัวแยกแสงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูาตใหนำไปเซประโยชนดานการค้ำไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้แสงลำที่ 2 ทำมุม 90 องศา กับลำแสงจากเลเซอร์เพื่อให้ลำแสงทั้ง 2 มีความเข้มแสงใกล้เคียงกันมากที่สุด จากนั้นเมื่อแสงลำที่ 2 ตกกระทบกระจก จะต้องปรับกระจกให้ลำแสงที่สะท้อนออกจากกระจกไปตกกระทบและซ้อนทับกับแสงลำที่ 1 ตรงกลางผลึกแบเรียมไททานเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียมพอดี โดยให้ลำแสงทั้งสองทำหน้าที่เป็นลำแสงตกกระทบที่มีคุณสมบัติทางแสงเหมือนกัน คือ ความยาวคลื่นเท่ากัน ความเข้มแสงใกล้เคียงกัน เฟสเดียวกัน และแกนการโพลาไรซ์แสงทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 3.7 แสดงการจัดอุปกรณ์การทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนอันดับสูงด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิกในผลึกแบเรียมไททานเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม



รูปที่ 3.8 แสดงแผนภาพการจัดอุปกรณ์การทดลอง ดังแสดงในรูป 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

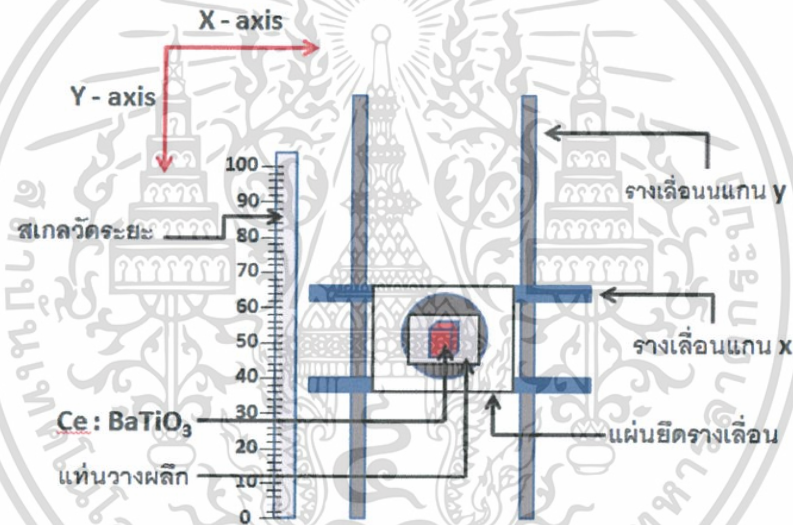
เมื่อแสง 2 ลำตกกระทบผลึกแบเรียมไททานตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม แสงจะกระเจิงภายในผลึกและแทรกสอดกันเกิดเป็นแถบมืดแถบสว่าง ทำให้อะตอมภายในผลึกเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ตามแถบการแทรกสอดที่เกิดขึ้น จากนั้นเกิดสนามไฟฟ้าที่ว่างประจุขึ้น และเกิดการสร้างเกรตติงขึ้นภายในผลึกตามทิศของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เปรียบเสมือนสลิตช่องเล็ก ๆ ทำให้ค่าดัชนีหักเหภายในผลึกแต่ละแกนเปลี่ยนแปลง เมื่อแสงตกกระทบส่งผ่านพลังงานซึ่งกันและกัน จะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของแสงผ่านช่องสลิตเล็ก ๆ ของเกรตติงที่ถูกสร้างขึ้น ถ้ามุมตกกระทบของแสงเลเซอร์เหมาะสม เป็นไปตามเงื่อนไขการเลี้ยวเบนของแบรกก์ แสงจะเกิดการเลี้ยวเบนไปตกกระทบบนฉากด้วยความเข้มแสงสูงที่สุด ซึ่งเป็นปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิกในผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์แบบทัศนศาสตร์ไม่เชิงเส้น

### 3.4 ขั้นตอนการทดลองการเกิดปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก

ขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาการเกิดลำแสงเลี้ยวเบนอันดับสูงของปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิกในผลึกแบเรียมไททานตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม โดยมีวิธีการทดลองตามขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. จัดอุปกรณ์การทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งอุปกรณ์ทั้งหมดติดตั้งบนโต๊ะทดลองทางแสง เพื่อลดการรบกวนจากการสั่นสะเทือน และอุปกรณ์ทุกชิ้นต้องสะอาดปราศจากฝุ่น เพื่อลดการกระเจิงของแสงเมื่อตกกระทบอุปกรณ์ และต้องทำการทดลองในห้องมืด
2. ขั้นตอนการจัดอุปกรณ์การทดลองต้องปรับแนวการเดินทางของแสง (Alignment) ให้เป็นเชิงเส้นอยู่ในระดับเดียวกันทั้งแกน  $x$  และ แกน  $z$  โดยปรับระดับของแท่นยึดตัวเลเซอร์ และตั้งเกตลำแสงที่ส่องออกมาจากตัวเลเซอร์อยู่ในระดับเดียวกัน และต้องปรับให้ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบที่ตำแหน่งกลางของอุปกรณ์แต่ละชิ้น เพื่อลดการกระเจิงแสงที่ขอบของอุปกรณ์
3. ปรับลำแสงจากเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ให้ทิศการโพลาไรซ์ของแสงขนานกับแกนแสงของผลึก ( $c$ -axis) ตกกระทบตัวแยกแสง ลำแสงถูกแยกออกเป็น 2 ลำ โดยลำที่ 1 ผ่านตัวแยกแสงไปตกกระทบผลึกแบเรียมไททานตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม และแสงลำที่ 2 หักเหจากตัวแยกแสง หมุนตัวแยกแสงเพื่อให้แสงลำที่ 2 ทำมุม  $90^\circ$  องศา กับลำแสงจากตัวเลเซอร์ ไปตกกระทบบนกระจก
4. ปรับกระจกเพื่อให้แสงลำที่ 2 สะท้อนไปตกกระทบและซ้อนทับกับแสงลำที่ 1 ตรงกลางผลึกพอดี
5. ในการวางผลึกบนแท่นวาง ต้องจัดให้แกนแสงของผลึกอยู่ในระนาบแกน  $z$  และเลื่อนแท่นวางผลึกที่ติดตั้งอยู่บนรางเลื่อน เพื่อปรับให้แสงเลเซอร์ตกกระทบที่ตำแหน่งกลางของผลึก

- พอดี โดยปรับรางเลื่อนในแกน x และปรับรางเลื่อนในแกน y เพื่อให้แสงทั้ง 2 ลำ ตกกระทบบนมุมที่เหมาะสมกับผลึก และเกิดลำแสงเลี้ยวเบนที่มีความเข้มแสงมากที่สุด
- ปรับระยะรางเลื่อนในแกน y ครั้งละ 1 เซนติเมตร เพื่อให้มุมตกกระทบบน 1 ค่า และสังเกตลำแสงเลี้ยวเบนที่ตกกระทบบนฉาก ซึ่งวางฉากรับแสงห่างจากผลึกประมาณ 10 ถึง 20 เซนติเมตร และปรับรางเลื่อนในแกน y ไปเรื่อย ๆ จนได้ผลการทดลอง คือได้มุมตกกระทบบนที่เหมาะสมในการเกิดลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 2 และอันดับที่ 3 ตามลำดับ
  - ในระหว่างที่ปรับระยะด้วยรางเลื่อนในแกน y ต้องปรับรางเลื่อนในแกน x ด้วยเพื่อให้แสงทั้ง 2 ลำ ซ้อนทับกันตรงกลางผลึกพอดี เพราะเมื่อเลื่อนตำแหน่งของผลึกไปทำให้มุมตกกระทบบนของลำแสงเปลี่ยนไป จากนั้นอ่านระยะที่เปลี่ยนไปของผลึกด้วยสเกลวัดระยะความยาว 1 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.9

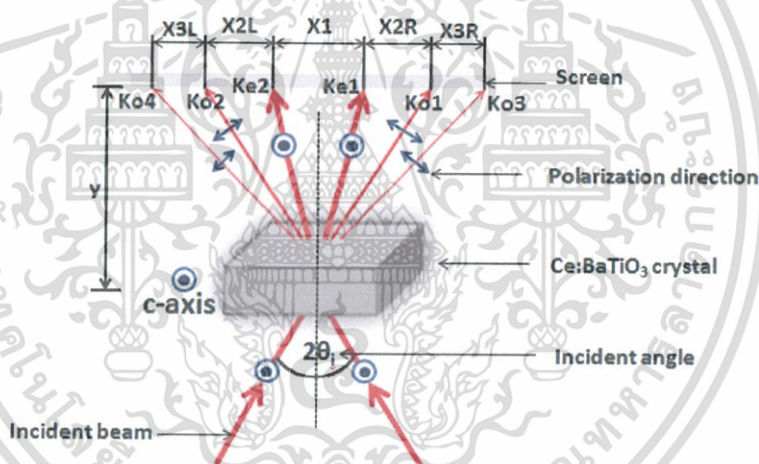


รูปที่ 3.9 แสดงการปรับระยะผลึกด้วยรางเลื่อนในแกน x และ แกน y

- บันทึกระยะในการเลื่อนผลึกแต่ละค่า วัดระยะลำแสงจากตัวแยกแสงถึงผลึก (ลำแสง 1) คือตำแหน่ง 0 เซนติเมตร ในแกน y บนสเกลวัดระยะ ให้เป็น a และวัดระยะลำแสงจากตัวแยกแสงถึงกระจกสะท้อนแสง (ลำแสง 2) ให้เป็น b ดังแสดงในรูปที่ 3.11
- คำนวณหามุมตกกระทบบนของแสงที่กระทำกับผลึกที่ทำให้เกิดเฉพาะลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 2 และเกิดลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 2 กับอันดับที่ 3 พร้อมกัน ซึ่งมุมตกกระทบบนที่สนใจคือมุมตกกระทบบนที่ทำให้เกิดลำแสงเลี้ยวเบนที่มีความเข้มแสงมากที่สุดจากการสังเกตบนฉากรับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. ปรับระยะวางเลื่อนในแกน  $y$  โดยเพิ่มความละเอียดครั้งละ 0.5, 0.4, 0.3, 0.2 และ 0.1 เซนติเมตร ในตำแหน่งที่คาดว่าจะเกิดการเลี้ยวเบนแสงอันดับที่ 2 และ อันดับที่ 3 เพื่อหา มุมตกกระทบที่ได้ค่าความเข้มของลำแสงเลี้ยวเบนมากกว่าเดิม และคำนวณหามุมตกกระทบ ตามข้อ 9
11. วัดระยะระหว่างลำแสงเลี้ยวเบนแต่ละอันดับที่เกิดขึ้นพร้อมกัน ทั้งด้านซ้ายและด้านขวา ของเส้นปกติ (Normal line) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 เพื่อใช้ในการคำนวณมุมเลี้ยวเบนของแสงแต่ละอันดับ พร้อมกับวัดค่าความเข้มแสงตกกระทบ และความเข้มของแสงเลี้ยวเบน ทุกครั้งที่สามารถสังเกตเห็นลำแสงเลี้ยวเบนได้ โดยใช้มิเตอร์วัดความเข้มแสง
12. บันทึกภาพลำแสงเลี้ยวเบนที่ตกกระทบบนฉากรับแสง ด้วยกล้องบันทึกภาพ CCD
13. ในการทดลองใช้แหล่งกำเนิดแสงสีแดง จากเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ความยาวคลื่นแสง 633 นาโนเมตร แต่มีกำลังของแสงแตกต่างกัน 2 ค่า คือ 10 มิลลิวัตต์ และ 25 มิลลิวัตต์ ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองจากแหล่งกำเนิดแสงที่มีกำลังแตกต่างกัน



รูปที่ 3.10 แสดงการวัดระยะลำแสงตกกระทบและลำแสงเลี้ยวเบนแต่ละอันดับที่ตกกระทบบนฉากรับแสงของปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก

14. นำผลการทดลองบันทึกลงในตารางบันทึกผล คำนวณหามุมตกกระทบ และมุมเลี้ยวเบนของลำแสงแต่ละอันดับ
15. ใช้แผ่นโพลาไรเซอร์เพื่อตรวจสอบแกนการโพลาไรซ์ของลำแสงเลี้ยวเบนอันดับสูงว่าลำแสงเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นเป็นการเลี้ยวเบนของปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิกถูกต้องตามทฤษฎี



สามารถคำนวณหามุมตกกระทบของลำแสงตกกระทบกับผลึก ได้ดังสมการ

$$\tan 2\theta_i = \frac{b}{(a+c)} \rightarrow 2\theta_i = \tan^{-1} \frac{b}{(a+c)} \quad (3.1)$$

ดังนั้น

$$\theta_i = \frac{\tan^{-1} \frac{b}{(a+c)}}{2} \quad (3.1-1)$$

- เมื่อ
- a คือ ระยะของลำแสงที่ 1 จากตัวแยกแสงถึงผลึกในหน่วยเซนติเมตร (cm)
  - b คือ ระยะของลำแสงที่ 2 จากตัวแยกแสงถึงกระจกสะท้อนแสงในหน่วยเซนติเมตร (cm)
  - c คือ ระยะที่ผลึกเลื่อนในแกน y ในหน่วยเซนติเมตร (cm)

มุม  $2\theta_i$  คือมุมตกกระทบระหว่างแสงเลเซอร์ 2 ลำกับผลึก ดังนั้นมุม  $\theta_i$  คือ มุมตกกระทบของแสงตกกระทบ 1 ลำกับเส้นปกติที่ตั้งฉากกับผิวหน้าผลึก

คำนวณหามุมเลี้ยวเบน  $\theta_d$  ของลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 อันดับที่ 2 และอันดับที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และ 2.12 โดยใช้ระยะห่างระหว่างลำแสงเลี้ยวเบนแต่ละอันดับ และระยะห่างระหว่างผลึกถึงฉากรับแสง (ระยะ y) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 และใช้ทฤษฎีพีทาโกรัสในการคำนวณ

$$\tan \theta_{d1} = \frac{X_1}{2y} \quad \text{จะได้ว่า} \quad \theta_{d1} = \tan^{-1} \frac{X_1}{2y} \quad (3.2)$$

$$\tan \theta_{d2} = \frac{\frac{X_1}{2} + X_{2R}}{y} \quad \text{จะได้ว่า} \quad \theta_{d2} = \tan^{-1} \frac{\frac{X_1}{2} + X_{2R}}{y} \quad (3.3)$$

$$\tan \theta_{d3} = \frac{\frac{X_1}{2} + X_{2R} + X_{3R}}{y} \quad \text{จะได้ว่า} \quad \theta_{d3} = \tan^{-1} \frac{\frac{X_1}{2} + X_{2R} + X_{3R}}{y} \quad (3.4)$$

เมื่อ y คือ ระยะห่างจากผลึกถึงฉากรับแสง ในหน่วยเซนติเมตร (cm)

$X_1$  คือ ระยะระหว่างลำแสงเลี้ยวเบนอันดับ 1 ( $Ke_1$  และ  $Ke_2$ ) ในหน่วยเซนติเมตร (cm)

$X_{2R}, X_{2L}, X_{3R}, X_{3L}$  คือ ระยะระหว่างลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 กับอันดับที่ 2 และอันดับที่ 2 กับอันดับที่ 3 ด้านขวาและด้านซ้าย ตามลำดับ ในหน่วยเซนติเมตร (cm)

$\theta_{d1}$  คือ มุมระหว่างเส้นปกติ กับลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 ในหน่วยองศา (degree)

$\theta_{d2}$  คือ มุมระหว่างเส้นปกติ กับลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 2 ในหน่วยองศา (degree)

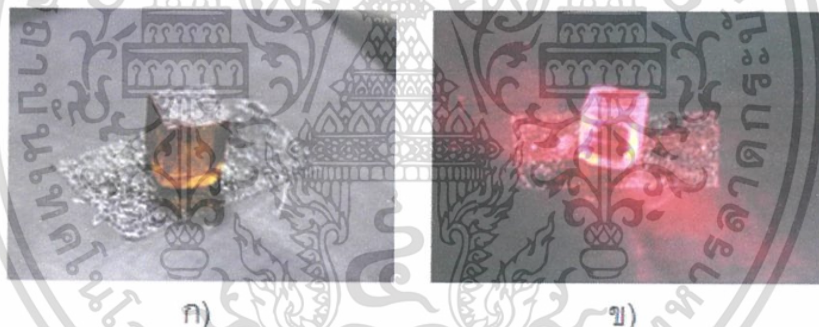
$\theta_{d3}$  คือ มุมระหว่างเส้นปกติ กับลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 3 ในหน่วยองศา (degree)

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 มุมตกกระทบของลำแสงจากปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก

จากการทดลองเพื่อศึกษาลำแสงเลี้ยวเบนจากปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิกในผลึกแบเรียมไททานเตชไนต์เจือด้วยอะตอมซีเรียม ซึ่งผลึกที่ใช้ในการทดลองแสดงในรูปที่ 4.1 โดยรูป 4.1(ก) ยังไม่ส่องสว่างลำแสงตกกระทบผลึก สังเกตว่าผลึกมีลักษณะใสเป็นสีส้มเหลือง แต่เมื่อส่องสว่างลำแสง 2 ลำที่มีความเป็นโคฮีเรนต์ตกกระทบผลึก (ลำแสงที่ 1 และลำแสงที่ 2) และตัดกันภายในผลึกด้วยมุมตกกระทบที่เหมาะสม จะทำให้ลำแสงทั้งสองลำแทรกสอดกันเกิดเป็นแถบมืดแถบสว่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.1(ข) สังเกตเห็นว่าแสงจะมีการกระเจิงเต็มผลึก ซึ่งเลเซอร์ที่ใช้คือเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนแสงสีแดงความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร ที่มีกำลังของแสงแตกต่างกัน 2 ค่า คือ 10 มิลลิวัตต์ และ 25 มิลลิวัตต์



รูปที่ 4.1 แสดงผลึกแบเรียมไททานเตชไนต์เจือด้วยอะตอมซีเรียม ( $\text{Ce:BaTiO}_3$ ) ที่ใช้ในการทดลอง  
ก) เมื่อไม่มีแสงตกกระทบผลึก ข) เมื่อส่องสว่างลำแสงตกกระทบผลึก

และผลจากการแทรกสอดของลำแสงตกกระทบ ส่งผลให้อะตอมภายในผลึกถูกกระตุ้นจากลำแสงและเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ ผลึกสามารถสร้างสนามที่ว่างประจุขึ้น (Space-charge field) แบบเป็นคาบตามแถบการแทรกสอดของแสง เป็นสาเหตุให้ค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลางมีความแตกต่างกัน จากนั้นผลึกสามารถสร้างดัชนีเกรตติง (Index grating) ขึ้น เรียกว่าปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรคทีฟ (Photorefractive effect) ทำให้ลำแสงสามารถเลี้ยวเบนผ่านเกรตติงออกจากแนวของลำแสงตกกระทบ เกิดเป็นลำแสงเลี้ยวเบนอันดับสูงตามมุมตกกระทบ  $\theta$  ที่เหมาะสม ซึ่งเรียกว่า ปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก (Anisotropic self-diffraction : ASD) จากนั้นในการเปลี่ยนมุมตกกระทบ  $\theta$  จำเป็นต้องเปลี่ยนตำแหน่งของผลึก ดังแสดงในรูปที่ 3.11 และทำการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะของผลึกที่เปลี่ยนแปลง (ระยะ a, b และ c) เพื่อนำมาคำนวณหามุมตกกระทบของลำแสง ซึ่งมุมตกกระทบ  $\theta_i$  คือมุมตกกระทบของลำแสงระหว่างลำแสงตกกระทบ 1 ลำกับแนวเส้นปกติที่ตั้งฉากกับผิวหน้าผลึกที่สามารถสังเกตลำแสงเลี้ยวเบนได้ชัดเจนที่สุด หรือมีค่าความเข้มของแสงมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยทำการทดลอง 10 ครั้งเพื่อหามุมตกกระทบเฉลี่ยของลำแสง ดังแสดงในตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3

จากตารางที่ 4.1 แสดงระยะการเปลี่ยนตำแหน่งของผลึก และมุมตกกระทบของลำแสงเพื่อศึกษาลำแสงเลี้ยวเบนจากปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิกในผลึกแบบเรียบไททานเตชชนิดเจ็ดด้วยอะตอมซีเรียม โดยใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออนเป็นแหล่งกำเนิดแสงสีแดงความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร กำลังแสง 10 มิลลิวัตต์ ซึ่งสามารถสังเกตลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 และ 2 ตกกระทบบนฉากที่มีความเข้มแสงสูงสุดที่มุมตกกระทบ  $\theta_i$  เท่ากับ 10.68 องศา

จากนั้นในตารางที่ 4.2 ได้ทำการทดลองเหมือนเดิมแต่เปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ที่มีกำลังแสงสูงขึ้นเป็น 25 มิลลิวัตต์ ซึ่งสามารถสังเกตลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 และ 2 ที่ตกกระทบบนฉากมีความเข้มแสงสูงสุดที่มุมตกกระทบ  $\theta_i$  เท่ากับ 10.36 องศา

ตารางที่ 4.1 แสดงตำแหน่งของผลึก และมุมตกกระทบเมื่อเกิดลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 และ 2 โดยใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน กำลังแสง 10 มิลลิวัตต์

การทดลอง	a (cm)	b (cm)	c (cm)	$\theta_i$ (degree)
1	17.0	8.5	4.6	10.74
2	17.0	8.5	4.8	10.65
3	17.0	8.5	4.6	10.74
4	17.0	8.5	4.8	10.65
5	17.0	8.5	4.9	10.61
6	17.0	8.5	4.7	10.70
7	17.0	8.5	4.6	10.74
8	17.0	8.5	4.6	10.74
9	17.0	8.5	5.0	10.56
10	17.0	8.5	4.8	10.65
มุมเฉลี่ยของลำแสงตกกระทบ				<b>10.68</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงตำแหน่งของผลึก และมุมตกกระทบเมื่อเกิดลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 และ 2 โดยใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน กำลังแสง 25 มิลลิวัตต์

การทดลอง	a (cm)	b (cm)	c (cm)	$\theta_i$ (degree)
1	17.0	7.5	2.7	10.42
2	17.0	7.5	2.7	10.42
3	17.0	7.5	2.8	10.37
4	17.0	7.5	3.0	10.28
5	17.0	7.5	2.8	10.37
6	17.0	7.5	3.0	10.28
7	17.0	7.5	2.8	10.37
8	17.0	7.5	2.8	10.37
9	17.0	7.5	2.7	10.42
10	17.0	7.5	3.0	10.28
มุมเฉลี่ยของลำแสงตกกระทบ				<b>10.36</b>

จากผลการทดลองจะเห็นว่ามุมตกกระทบของลำแสงที่กำลังของเลเซอร์ 10 มิลลิวัตต์ กับ 25 มิลลิวัตต์ มีความแตกต่างกันเพียง 0.32 องศา แสดงว่ากำลังของแสงเลเซอร์แตกต่างกันไม่ส่งผลกระทบต่อมุมตกกระทบของลำแสง ในการเกิดลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 และอันดับที่ 2

เมื่อทำการทดลอง โดยการเปลี่ยนตำแหน่งของผลึก คือการเปลี่ยนระยะ c ดังแสดงในรูปที่ 3.11 เพื่อให้มุมตกกระทบ  $\theta$  มีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนถึงมุมตกกระทบที่เหมาะสมจะสามารถสังเกตเห็นลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 อันดับที่ 2 และอันดับที่ 3 ที่มีความเข้มแสงสูงสุดเกิดขึ้นพร้อมกันตกกระทบบนฉากรับแสง ซึ่งมุมตกกระทบ  $\theta$  ที่เหมาะสม คือ 6.05 องศา ดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยลำแสงเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นที่มุมตกกระทบดังกล่าว เมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่มีกำลัง 10 มิลลิวัตต์ สามารถสังเกตเห็นเพียงลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 และ 2 ไม่สามารถสังเกตเห็นลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 3 แต่เมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีกำลัง 25 มิลลิวัตต์ สามารถสังเกตเห็นลำแสงเลี้ยวเบนเกิดขึ้นพร้อมกันทั้งอันดับที่ 1 อันดับที่ 2 และอันดับที่ 3

แสดงว่ากำลังของลำแสงตกกระทบส่งผลต่อการเกิดลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่สูงขึ้น คืออันดับที่ 3 ซึ่งถ้าใช้แหล่งกำเนิดแสงตกกระทบที่มีกำลังของแสงต่ำเกินไป จะไม่สามารถสังเกตเห็นลำแสงเลี้ยวเบนอันดับสูงได้ จำเป็นต้องใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีกำลังสูง ๆ จึงจะสามารถสังเกตเห็นลำแสงอันดับที่สูงขึ้นได้

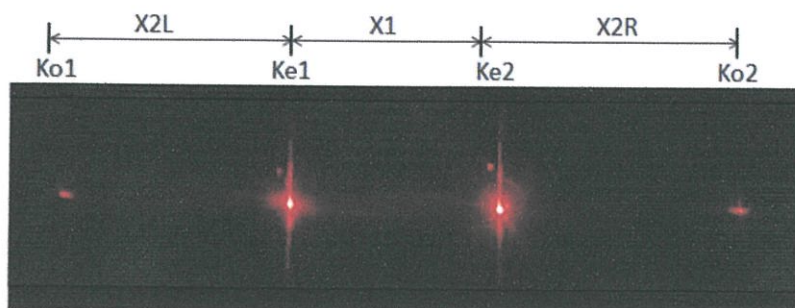
ตารางที่ 4.3 แสดงตำแหน่งของผลึก และมุมตกกระทบเมื่อเกิดลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1, 2 และ 3 โดยใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน กำลังแสง 25 มิลลิวัตต์

การทดลอง	a (cm)	b (cm)	c (cm)	$\theta_i$ (degree)
1	17.0	7.5	17.9	6.06
2	17.0	7.5	18.1	6.03
3	17.0	7.5	17.9	6.06
4	17.0	7.5	17.9	6.06
5	17.0	7.5	17.9	6.06
6	17.0	7.5	17.9	6.06
7	17.0	7.5	17.9	6.06
8	17.0	7.5	18.1	6.03
9	17.0	7.5	17.9	6.03
10	17.0	7.5	18.1	6.03
มุมเฉลี่ยของลำแสงตกกระทบ				<b>6.05</b>

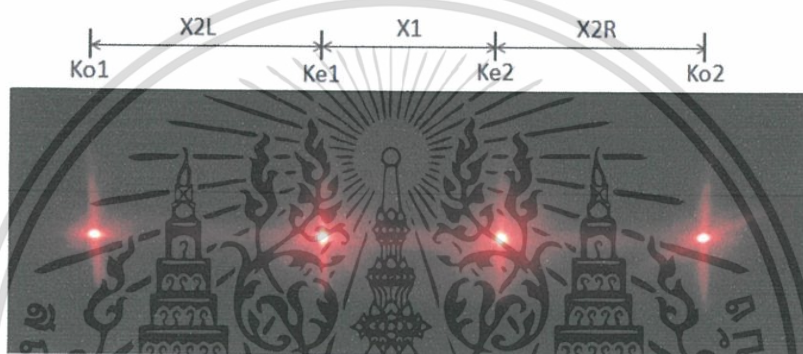
#### 4.2 ภาพลำแสงเลี้ยวเบนของปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก

ภาพของลำแสงเลี้ยวเบนจากปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก สามารถสังเกตได้บนฉากรับแสง ที่วางอยู่ด้านหลังของผลึก และบันทึกภาพโดยใช้กล้อง CCD ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 ( $K_{e1}$  กับ  $K_{e2}$ ) และ อันดับที่ 2 ( $K_{o1}$  กับ  $K_{o2}$ ) ทั้งด้านซ้ายและด้านขวาของแนวเส้นปกติ ที่มุมตกกระทบ  $\theta_i$  เท่ากับ 10.68 องศา โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่มีกำลังแสง 10 มิลลิวัตต์

ส่วนในรูปที่ 4.3 แสดงถึงลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 และอันดับที่ 2 ของปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก ที่ตกกระทบบนฉากรับแสง ที่มุมตกกระทบ  $\theta_i$  เท่ากับ 10.36 องศา โดยใช้ลำแสงเลเซอร์ที่มีกำลังแสง 25 มิลลิวัตต์ จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 พบว่าลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 ( $K_{e1}$  กับ  $K_{e2}$ ) ทั้งด้านซ้ายและด้านขวา มีความเข้มแสงมากกว่าลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 2 ( $K_{o1}$  กับ  $K_{o2}$ ) ที่กำลังแสงเท่ากัน และการเกิดลำแสงเลี้ยวเบนทั้งอันดับที่ 1 อันดับที่ 2 เมื่อใช้เลเซอร์ที่มีกำลังแสง 25 มิลลิวัตต์ มีความเข้มแสงมากกว่าลำแสงเลี้ยวเบนจากการใช้เลเซอร์ที่มีกำลังแสง 10 มิลลิวัตต์ ที่มุมตกกระทบ  $\theta_i$  มุมเดียวกัน

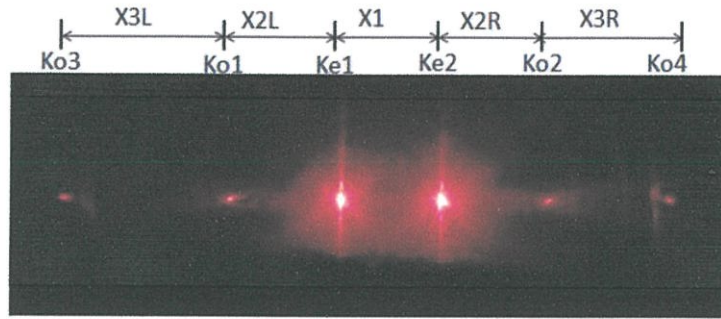


รูปที่ 4.2 แสดงลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 และ อันดับที่ 2 ของปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก โดยใช้เลเซอร์กำลังแสง 10 มิลลิวัตต์

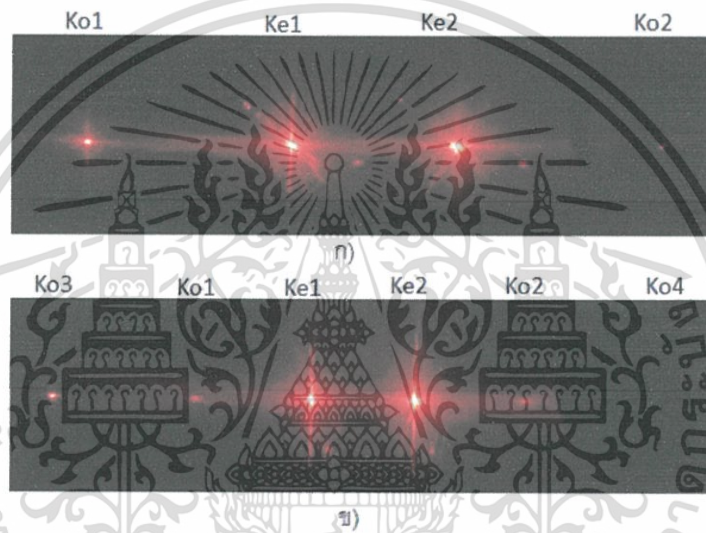


รูปที่ 4.3 แสดงลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 และ อันดับที่ 2 ของปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก โดยใช้เลเซอร์กำลังแสง 25 มิลลิวัตต์

จากนั้นเมื่อเลื่อนตำแหน่งของผลึกในแกน  $y$  เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จะทำให้มุมตกกระทบของลำแสงมีค่าลดลงตามไปด้วย ซึ่งสามารถสังเกตเห็นว่าความเข้มของลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 2 ( $Ko1$  กับ  $Ko2$ ) ค่อย ๆ ลดลงจนจางหายไป และเมื่อมุมตกกระทบลดลงอีกจะค่อย ๆ สังเกตเห็นลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 2 เกิดขึ้นอีกครั้ง และลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 3 ( $Ko3$  กับ  $Ko4$ ) ก็ค่อย ๆ เกิดขึ้นตามมา ตกกระทบบนฉากรับแสง ซึ่งลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 อันดับที่ 2 และ อันดับที่ 3 สามารถเกิดขึ้นพร้อมกันมีความเข้มแสงสูงที่สุด ที่มุมตกกระทบ  $\theta_i$  เท่ากับ  $6.05$  องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นผลการทดลองที่สามารถสังเกตเห็นเป็นครั้งแรกที่การเลี้ยวเบนทั้ง 3 อันดับสามารถเกิดขึ้นพร้อมกัน โดยลำแสงเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีกำลัง 25 มิลลิวัตต์ แต่เมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีกำลังน้อย 10 มิลลิวัตต์ ไม่สามารถสังเกตเห็นลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 3 ได้ เนื่องจากความเข้มแสงน้อยเกินไปทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นลำแสงอันดับที่สูงขึ้นได้



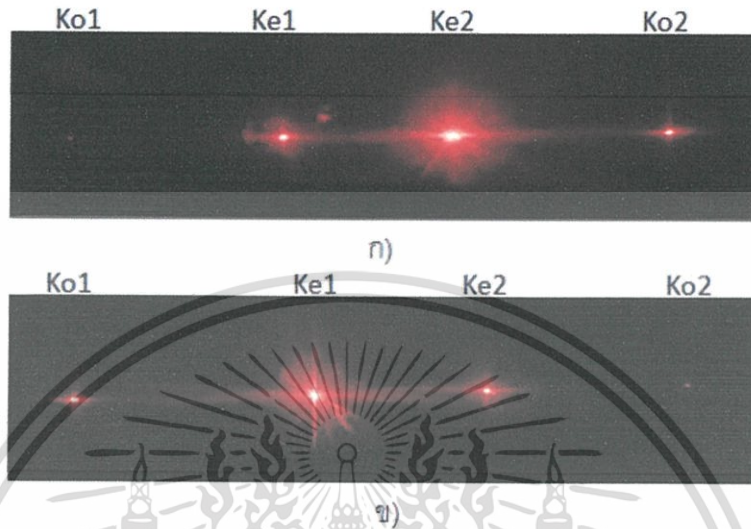
รูปที่ 4.4 แสดงลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 อันดับที่ 2 และ อันดับที่ 3 ของปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก โดยใช้เลเซอร์กำลังแสง 25 มิลลิวัตต์



รูปที่ 4.5 แสดงการตรวจสอบแกนโพลาไรซ์ของลำแสงตกกระทบกับลำแสงเลี้ยวเบนอันดับสูง  
ก) แผ่นโพลาไรเซอร์ตั้งฉากกับแกนโพลาไรซ์แสง Ko2 (ลำแสงเลี้ยวเบน 2 อันดับ)  
ข) แผ่นโพลาไรเซอร์ตั้งฉากกับแกนโพลาไรซ์แสง Ko4 (ลำแสงเลี้ยวเบน 3 อันดับ)

ซึ่งลำแสงเลี้ยวเบนอันดับสูงที่เกิดขึ้นทั้งหมดเป็นลำแสงจากการเกิดปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก (Anisotropic self-diffraction : ASD) และเพื่อพิสูจน์ว่าลำแสงเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นนั้นเป็นลำแสงเลี้ยวเบนที่เกิดจากปรากฏการณ์ ASD ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ รูปที่ 4.3 สามารถตรวจสอบได้โดยนำแผ่นโพลาไรเซอร์มาวางขวางลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 2 (Ko2) ซึ่งลำแสงเลี้ยวเบนนี้จะมีทิศทางโพลาไรซ์ที่ตั้งฉากกับลำแสงตกกระทบหรือลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 (Ke1 และ Ke2) โดยแผ่นโพลาไรเซอร์ดังกล่าวจะถูกหมุนให้แกนโพลาไรซ์มีทิศเดียวกับลำแสงตกกระทบ จะพบว่าลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 2 มีความเข้มแสงน้อยมาก หรือแทบจะไม่ปรากฏบนฉากรับแสง ดังแสดงในรูปที่ 4.5(ก) และเพื่อแสดงให้เห็นว่าลำแสงเลี้ยวเบนอันดับสูงมีทิศทางโพลาไรซ์ที่ตั้งฉากกับแสงตกกระทบ จึงได้ทำการหมุนแผ่นโพลาไรเซอร์ให้มีทิศตั้งฉาก

กับแสงตกกระทบ พบว่าลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 2 จะกลับมามีความสว่างดั้งเดิมบนจากรับแสง ส่วนในรูปที่ 4.5(ข) เป็นการตรวจสอบแกน โพลาไรซ์ของลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 3 (Ko4) พบว่า แกน โพลาไรซ์มีทิศตั้งฉากกับลำแสงตกกระทบ เช่นเดียวกับกรณีเกิดลำแสงเลี้ยวเบน 2 อันดับ

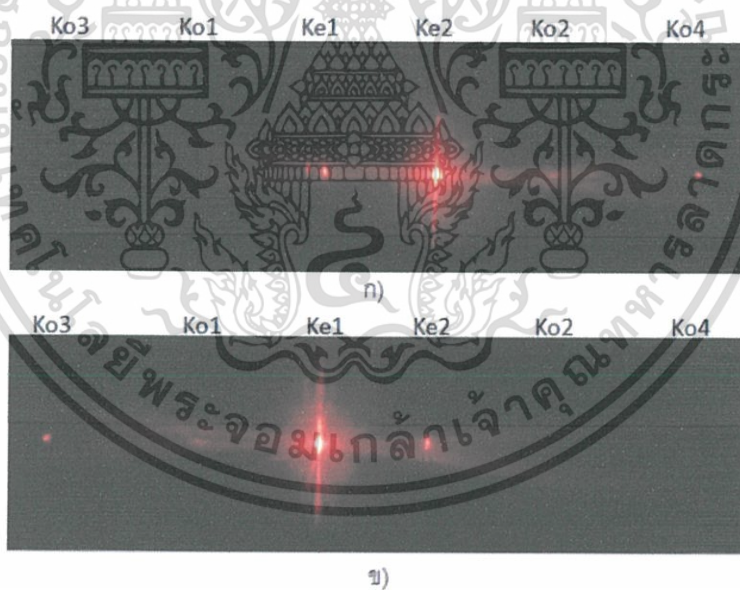


รูปที่ 4.6 แสดงการถ่ายโอนพลังงานของลำแสงตกกระทบภายในผลึก เกิดลำแสงเลี้ยวเบน 2 อันดับ  
 ก) ขวางลำแสงตกกระทบลำที่ 1 ข) ขวางลำแสงตกกระทบลำที่ 2

ในการเกิดลำแสงเลี้ยวเบนของปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก จะต้องเกิดปรากฏการณ์การผสมคลื่น 4 ขบวนขึ้นด้วย (Four-wave mixing : FWM) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากเกรตติงที่เกิดขึ้นเพราะปรากฏการณ์โฟโตรีแฟกทีฟ (Photorefractive effect) สามารถตรวจสอบได้โดยการขวางลำแสงตกกระทบ 1 ลำ (ลำแสงที่ 1 หรือ ลำแสงที่ 2) แล้วสังเกตลำแสงเลี้ยวเบนทั้งหมดที่ตกกระทบบนจากรับแสง ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งในรูปที่ 4.6(ก) ทดลองขวางลำแสงตกกระทบลำที่ 1 (Beam 1) จะสังเกตเห็นว่าลำแสงตกกระทบหรือลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 (Ke1) ยังคงมีความสว่างอยู่ แต่ความเข้มแสงลดลง และลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 2 (Ko1) ค่อย ๆ จางลงและหายไป เมื่อส่องสว่างลำแสงเหมือนเดิม ลำแสงเลี้ยวเบนทั้งหมดกลับมาสว่างมีความเข้มแสงเหมือนเดิม ส่วนในรูปที่ 4.6(ข) ทดลองขวางลำแสงตกกระทบลำที่ 2 (Beam 2) ลำแสงตกกระทบหรือลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 (Ke2) ยังคงมีความสว่างอยู่เช่นเดียวกัน และลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 2 (Ko2) ค่อย ๆ จางลงและหายไป เมื่อส่องสว่างลำแสงเหมือนเดิม ลำแสงเลี้ยวเบนทั้งหมดกลับมาสว่างเหมือนเดิม เช่นเดียวกับกรณีแรก แสดงว่าลำแสงที่เกิดขึ้นมาจากการเลี้ยวเบนจากลำแสงอื่น ทั้ง ๆ ที่ขวางลำแสงนั้น ไว้แต่ลำแสงยังปรากฏอยู่ ซึ่งนั่นคือลำแสงตกกระทบลำที่ 1 เลี้ยวเบนผ่านเกรตติงเกิดลำแสงเลี้ยวเบน Ke1 และลำแสงตกกระทบลำที่ 2 เลี้ยวเบนผ่านเกรตติงเกิดลำแสงเลี้ยวเบน Ke2 ส่งผลให้เกิดเป็นลำแสง 4 ลำ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่น 4 ขบวน ส่วนในรูปที่ 4.7 เป็นการทดลองเมื่อเกิดลำแสงเลี้ยวเบน 3 อันดับ ทำการทดลองเช่นเดียวกับเกิดลำแสงเลี้ยวเบน 2 อันดับ พบว่าเมื่อขวางลำแสงตกกระทบลำที่ 1 ลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 (Ke1) ยังคงปรากฏอยู่ แต่มีความเข้มลดลง และลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 2 (Ko1) ลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 3 (Ko3) จางหายไป แต่เมื่อปล่อยลำแสงตกกระทบลำแสงก็กลับมา มีความสว่างเช่นเดิม ดังแสดงในรูปที่ 4.7(ก) และในรูปที่ 4.7(ข) ขวางลำแสงตกกระทบลำที่ 2 พบว่าลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 (Ke2) ยังคงปรากฏอยู่ แต่ความเข้มแสงลดลง และลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 2 (Ko2) ลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 3 (Ko4) จางหายไป แต่เมื่อปล่อยลำแสงตกกระทบลำแสงก็กลับมา มีความสว่างเช่นเดิม แสดงถึงการเกิดปรากฏการณ์การผสมคลื่น 4 ขบวน (Four-wave mixing) ในการทดลองถ้าทำการขวางลำแสงตกกระทบลำที่ 1 หรือ ลำที่ 2) ไปเรื่อย ๆ ความเข้มแสงของลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 (Ke1 หรือ Ke2) จะค่อยๆลดลง และเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 5 นาที ลำแสงจะจางหายไป เพราะเมื่อขวางลำแสงตกกระทบลำที่ 1 ลำทำให้ลำแสงไม่สามารถแทรกสอดกันได้ ส่งผลให้เกรตติงที่สร้างขึ้นในผลึกค่อยๆหายไป ดังนั้นลำแสงเลี้ยวเบนจากปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองจึงไม่สามารถเกิดขึ้นได้ แต่เมื่อปล่อยลำแสงตกกระทบบลึกลงเช่นเดิมลำแสงเลี้ยวเบนค่อยๆปรากฏบนฉากรับแสงอีกครั้ง



รูปที่ 4.7 แสดงการถ่ายโอนพลังงานของลำแสงตกกระทบบนผลึก เกิดลำแสงเลี้ยวเบน 3 อันดับ  
 ก) ขวางลำแสงตกกระทบลำที่ 1 ข) ขวางลำแสงตกกระทบลำที่ 2

### 4.3 มุมเลี้ยวเบนของลำแสงจากปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก

จากผลการทดลองลำแสงเลี้ยวเบนที่ตกกระทบบนฉากรับแสง จะมีระยะห่างระหว่างลำแสงเลี้ยวเบนแต่ละอันดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 รูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 จากนั้นวัดระยะห่างระหว่างผลึกถึงฉากรับแสง (ระยะ  $y$ ) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 เพื่อนำมาใช้คำนวณหามุมเลี้ยวเบนระหว่างเส้นปกติกับลำแสงเลี้ยวเบน ( $\theta_d$ ) แต่ละอันดับ

จากตารางที่ 4.4 แสดงระยะต่าง ๆ ของลำแสงเลี้ยวเบน และมุมเลี้ยวเบนอันดับที่ 1  $\theta_{d1}$  และมุมเลี้ยวเบนอันดับที่ 2  $\theta_{d2}$  โดยใช้เลเซอร์กำลังแสง 10 มิลลิวัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งระยะห่างระหว่างผลึกกับฉากรับแสง ( $y$ ) มีผลต่อระยะระหว่างลำแสงเลี้ยวเบนแต่ละอันดับ และระยะห่างระหว่างลำแสงเลี้ยวเบนอันดับเดียวกันด้านซ้ายและด้านขวาจะมีค่าเท่ากัน (X2R เท่ากับ X2L และ X3R เท่ากับ X3L) ดังนั้นในการคำนวณมุมเลี้ยวเบนอันดับที่ 1  $\theta_{d1}$  และมุมเลี้ยวเบนอันดับที่ 2  $\theta_{d2}$  สามารถใช้ระยะด้านซ้าย หรือด้านขวาก็ได้ โดยใช้สมการที่ (3.2) และ (3.3) ในการคำนวณมุมเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 และอันดับที่ 2 ตามลำดับ ซึ่งมุมเลี้ยวเบนเฉลี่ยอันดับที่ 1 เท่ากับ 10.22 องศา และมุมเลี้ยวเบนเฉลี่ยอันดับที่ 2 เท่ากับ 32.08 องศา

ตารางที่ 4.4 แสดงมุมเลี้ยวเบนของแสงอันดับที่ 1 และ อันดับที่ 2 โดยใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน กำลังแสง 10 มิลลิวัตต์

การทดลอง	y (cm)	X1 (cm)	X2R (cm)	X2L (cm)	$\theta_{d1}$ (degree)	$\theta_{d2}$ (degree)
1	17.7	6.5	8.2	8.2	10.40	32.90
2	17.8	6.5	8.0	8.0	10.35	32.29
3	16.2	5.9	7.3	7.3	10.32	32.32
4	16.3	5.9	7.2	7.2	10.26	31.91
5	19.5	7.0	8.5	8.5	10.18	31.61
6	15.5	5.5	6.9	6.9	10.06	31.91
7	16.0	5.7	7.2	7.2	10.10	32.13
8	16.2	5.8	7.2	7.2	10.15	31.94
9	16.0	5.7	7.1	7.1	10.10	31.88
10	16.3	5.9	7.2	7.2	10.26	31.91
มุมเฉลี่ยของลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 และ 2					<b>10.22</b>	<b>32.08</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงมุมเลี้ยวเบนของแสงอันดับที่ 1 และ อันดับที่ 2 โดยใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน กำลังแสง 25 มิลลิวัตต์

การทดลอง	y (cm)	X1 (cm)	X2R (cm)	X2L (cm)	$\theta_{d1}$ (degree)	$\theta_{d2}$ (degree)
1	15.0	5.5	6.8	6.8	10.39	32.48
2	15.3	5.6	6.8	6.8	10.37	32.11
3	14.6	5.3	6.5	6.5	10.29	32.08
4	15.2	5.5	7.0	7.0	10.26	32.68
5	15.5	5.7	7.0	7.0	10.42	32.44
6	15.0	5.5	6.8	6.8	10.39	32.48
7	14.5	5.3	6.5	6.5	10.36	32.25
8	14.2	5.2	6.4	6.4	10.38	32.37
9	15.1	5.5	6.8	6.8	10.32	32.31
10	14.0	5.1	6.5	6.5	10.32	32.88
มุมเฉลี่ยของลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 และ 2					<b>10.35</b>	<b>32.41</b>

ตารางที่ 4.6 แสดงมุมเลี้ยวเบนของแสงอันดับที่ 1, 2 และ 3 โดยใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน กำลังแสง 25 มิลลิวัตต์

การทดลอง	y	X1	X2R	X2L	X3R	X3L	$\theta_{d1}$	$\theta_{d2}$	$\theta_{d3}$
	unit : cm						unit : degree		
1	20.2	4.2	4.6	4.6	5.6	5.6	5.94	18.35	31.34
2	18.1	3.8	4.1	4.1	5.0	5.0	5.99	18.34	31.29
3	18.3	3.8	4.2	4.2	5.2	5.2	5.93	18.43	31.69
4	17.6	3.7	3.9	3.9	4.9	4.9	6.00	18.09	31.18
5	17.2	3.5	3.7	3.7	4.7	4.7	5.81	17.58	30.55
6	17.5	3.6	3.9	3.9	4.8	4.8	5.87	18.04	30.96
7	17.5	3.6	3.8	3.8	4.8	4.8	5.87	17.74	30.72
8	16.4	3.4	3.5	3.5	4.6	4.6	5.92	17.59	30.86
9	19.9	4.1	4.4	4.4	5.4	5.4	5.88	17.96	30.77
10	18.6	3.9	4.2	4.2	5.2	5.2	5.98	18.30	31.39
มุมเฉลี่ยของลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1, 2 และ 3							<b>5.92</b>	<b>18.04</b>	<b>31.08</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ให้แก่ไปใช้ประโยชน์ตามการ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนระยะต่าง ๆ ของลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 และอันดับที่ 2 โดยใช้เลเซอร์กำลังแสง 25 มิลลิวัตต์ ในรูปที่ 4.3 สามารถนำมาคำนวณหามุมเลี้ยวเบน จากสมการที่ (3.2) และ (3.3) แสดงในตารางที่ 4.5 ได้มุมเลี้ยวเบนเฉลี่ยอันดับที่ 1  $\theta_{d1}$  เท่ากับ 10.35 องศา และมุมเลี้ยวเบนเฉลี่ยอันดับที่ 2  $\theta_{d2}$  เท่ากับ 32.41 องศา ส่วนในตารางที่ 4.5

จากนั้นในตารางที่ 4.6 แสดงระยะของลำแสงเลี้ยวเบนแต่ละอันดับ และมุมเลี้ยวเบนของลำแสง ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 อันดับที่ 2 และ อันดับที่ 3 เกิดขึ้นพร้อมกัน โดยใช้เลเซอร์กำลังแสง 25 มิลลิวัตต์ และใช้สมการที่ (3.2) ถึง (3.4) ในการคำนวณมุมเลี้ยวเบนทั้ง 3 อันดับ ตามลำดับ ซึ่งผลการคำนวณมุมเลี้ยวเบนเฉลี่ยอันดับที่ 1  $\theta_{d1}$  เท่ากับ 5.92 มุมเลี้ยวเบนเฉลี่ยอันดับที่ 2 เท่ากับ 18.04 และมุมเลี้ยวเบนเฉลี่ยอันดับที่ 3  $\theta_{d3}$  เท่ากับ 31.08 องศา

#### 4.4 ความเข้มแสงของลำแสงตกกระทบ และลำแสงเลี้ยวเบนแต่ละอันดับ

ลำแสงตกกระทบแต่ละลำ และลำแสงเลี้ยวเบนแต่ละอันดับที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิกมีความเข้มของแสงแตกต่างกัน ซึ่งในการทดลองได้ทำการวัดความเข้มของแสง (I) โดยใช้มิเตอร์วัดกำลังแสง (Power meter)

ตารางที่ 4.7 แสดงความเข้มแสงตกกระทบ และแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 และ 2 โดยใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน กำลังแสง 10 มิลลิวัตต์

การทดลอง	$I_0$	$I_{beam1}$	$I_{beam2}$	$I_{Ke1}$	$I_{Ke2}$	$I_{Ko1}$	$I_{Ko2}$
	unit : mW/cm <sup>2</sup>						
1	5.71	2.45	2.53	1.01	1.12	0.02	0.02
2	5.40	2.23	2.31	1.14	1.17	0.03	0.03
3	5.60	2.45	2.53	1.08	1.14	0.03	0.03
4	5.53	2.39	2.60	1.27	1.33	0.02	0.03
5	5.58	2.40	2.55	1.09	1.15	0.03	0.03
6	5.69	2.34	2.51	1.24	1.35	0.03	0.03
7	5.35	2.32	2.48	1.28	1.45	0.03	0.02
8	5.48	2.28	2.42	1.10	1.21	0.03	0.02
9	5.57	2.41	2.57	1.15	1.17	0.02	0.03
10	5.62	2.47	2.58	1.07	1.15	0.03	0.03
<b>กำลังแสงเฉลี่ย</b>	<b>5.55</b>	<b>2.37</b>	<b>2.51</b>	<b>1.14</b>	<b>1.22</b>	<b>0.03</b>	<b>0.03</b>
	<b>5.55</b>	$I_{incident} = 4.88$		$I_{diffracted} = 2.42$			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบให้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ข้อมูลภายนอกโดยไม่ได้รับความเห็นชอบจากเจ้าของลิขสิทธิ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กำหนดให้  $I_0$  คือ ความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน
- $I_{beam1}$  คือ ความเข้มของลำแสงตกกระทบลำที่ 1 (beam 1) ผ่านตัวแยกแสง
- $I_{beam2}$  คือ ความเข้มของลำแสงตกกระทบลำที่ 2 (beam 2) สะท้อนจากกระจก
- $I_{Ke1}, I_{Ke2}$  คือ ความเข้มของลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1
- $I_{Ko1}, I_{Ko2}$  คือ ความเข้มของลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 2
- $I_{Ko3}, I_{Ko4}$  คือ ความเข้มของลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 3

ตารางที่ 4.8 แสดงความเข้มแสงตกกระทบ และแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 และ 2 โดยใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน กำลังแสง 25 มิลลิวัตต์

การทดลอง	$I_0$	$I_{beam1}$	$I_{beam2}$	$I_{Ke1}$	$I_{Ke2}$	$I_{Ko1}$	$I_{Ko2}$
	unit : mW/cm <sup>2</sup>						
1	22.4	9.77	10.03	2.46	2.96	0.64	0.92
2	22.6	10.02	10.42	2.57	2.58	0.54	0.83
3	22.8	9.79	10.14	2.53	2.85	0.71	0.98
4	22.6	9.91	10.24	2.91	3.20	0.70	0.96
5	22.6	9.79	10.11	2.65	2.91	0.46	0.62
6	22.4	9.86	10.02	2.69	3.12	0.39	0.62
7	22.5	9.93	10.21	3.16	2.85	0.44	0.65
8	22.6	9.92	10.13	3.13	3.40	0.69	0.81
9	22.6	9.95	10.31	2.95	3.41	0.45	0.62
10	22.6	10.03	10.32	2.96	3.50	0.68	0.87
กำลังแสงเฉลี่ย	<b>22.57</b>	<b>9.90</b>	<b>10.19</b>	<b>2.80</b>	<b>3.08</b>	<b>0.57</b>	<b>0.79</b>
	<b>22.57</b>	$I_{incident} = 20.09$		$I_{diffracted} = 7.24$			

ในตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8 แสดงความเข้มของลำแสงตกกระทบและลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 และอันดับที่ 2 เมื่อใช้เลเซอร์กำลังแสง 10 มิลลิวัตต์ ที่มุมตกกระทบ 10.68 องศา และเลเซอร์กำลังแสง 25 มิลลิวัตต์ ที่มุมตกกระทบ 10.36 องศา ตามลำดับ พบว่าลำแสงตกกระทบลำที่ 1 และลำที่ 2 มีความเข้มแสงใกล้เคียงกันเนื่องจากผ่านตัวแยกแสง และเมื่อลำแสงทั้ง 2 ตัดกันภายในผลึกจะเกิดลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 ความเข้มแสงมีค่าลดลง และลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 2 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีความเข้มแสงน้อยกว่าลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 มาก เนื่องจากการถ่ายโอนพลังงานของลำแสง การหักเหผ่านเกรตติงของลำแสง และการกระเจิงของลำแสงภายในผลึก นอกจากนี้ลำแสงเลี้ยวเบนที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงที่มีกำลัง 25 มิลลิวัตต์ มีความเข้มแสงมากกว่าเมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีกำลัง 10 มิลลิวัตต์ เนื่องจากความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิดแสงที่มีกำลังสูงกว่าจะมีค่าความเข้มแสงมากกว่า

ตารางที่ 4.9 แสดงความเข้มแสงตกกระทบ และแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1, 2 และ 3 โดยใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน กำลังแสง 25 มิลลิวัตต์

การทดลอง	$I_0$	$I_{beam1}$	$I_{beam2}$	$I_{Ke1}$	$I_{Ke2}$	$I_{Ko1}$	$I_{Ko2}$	$I_{Ko3}$	$I_{Ko4}$
	unit : mW/cm <sup>2</sup>								
1	22.4	10.18	9.99	3.96	3.46	0.51	0.42	0.03	0.03
2	22.5	9.92	9.82	4.80	4.54	0.41	0.33	0.03	0.03
3	22.9	10.28	9.55	4.45	4.23	0.48	0.40	0.03	0.02
4	22.6	10.26	10.08	3.63	3.14	0.45	0.39	0.02	0.02
5	22.6	10.13	9.97	4.56	3.05	0.40	0.35	0.03	0.03
6	22.8	10.48	10.21	4.53	3.71	0.49	0.41	0.04	0.04
7	22.4	10.39	10.08	4.03	3.61	0.39	0.33	0.03	0.02
8	22.6	10.39	10.06	4.59	4.11	0.25	0.30	0.03	0.03
9	22.6	10.52	10.24	4.68	4.18	0.30	0.28	0.04	0.04
10	22.6	10.11	9.97	4.27	3.59	0.31	0.26	0.02	0.03
กำลังแสงเฉลี่ย	<b>22.60</b>	<b>10.27</b>	<b>10.00</b>	<b>4.35</b>	<b>3.76</b>	<b>0.40</b>	<b>0.35</b>	<b>0.03</b>	<b>0.03</b>
	<b>22.60</b>	$I_{incident} = 20.27$		$I_{diffracted} = 8.92$					

ส่วนในตารางที่ 4.9 แสดงความเข้มแสงตกกระทบและแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 อันดับที่ 2 และอันดับที่ 3 ซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกัน ที่มุมตกกระทบ 6.05 องศา โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ 25 มิลลิวัตต์ พบว่าลำแสงเลี้ยวเบนแต่ละอันดับมีความเข้มแสงลดลงจากลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 อันดับที่ 2 และอันดับที่ 3 ตามลำดับ และลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 ด้านซ้าย (Ke1) ถ่ายโอนพลังงานเพื่อสร้างลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 2 (Ko1) และลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 3 (Ko3) ส่วนลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 ด้านขวา (Ke2) ถ่ายโอนพลังงานเพื่อสร้างลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 2 (Ko2) และลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 3 (Ko4) ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเข้มของลำแสงเลี้ยวเบนแต่ละอันดับขึ้นอยู่กับความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้มของลำแสงตกกระทบลำที่ 1 และลำแสงตกกระทบลำที่ 2 นอกจากนี้พบว่าผลรวมความเข้มแสงเฉลี่ยของลำแสงเดี่ยวเบน ( $I_{incident}$ ) มีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของผลรวมความเข้มแสงเฉลี่ยของลำแสงตกกระทบบ ( $I_{diffracted}$ ) หรือกล่าวได้ว่าความเข้มแสงเดี่ยวเบนเหลือแค่ประมาณ 50% ของความเข้มแสงตกกระทบบ เนื่องจากเมื่อลำแสงตกกระทบบผลึก แสงจะเกิดการกระเจิงภายในผลึก และสะท้อนกลับที่ผิวหน้าผลึก ส่งผลให้ความเข้มแสงเดี่ยวเบนมีค่าลดลงจากความเข้มแสงตกกระทบบ

#### 4.5 การเปรียบเทียบมุมตกกระทบบ และมุมเดี่ยวเบนของลำแสง จากการทดลองกับผลการคำนวณทางทฤษฎี

จากผลการทดลองหามุมตกกระทบบ และมุมเดี่ยวเบนแต่ละอันดับของลำแสง จากปรากฏการณ์การเดี่ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่มีกำลังแสง 10 มิลลิวัตต์ และ 25 มิลลิวัตต์ จากนั้นนำมุมตกกระทบบ และมุมเดี่ยวเบนจากการทดลอง มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎีโดยใช้สมการ (2.90) ซึ่งเป็นสมการการเกิดเฟสแมทซิงของลำแสงเดี่ยวเบนอันดับสูง และจากตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของผลึกแบเรียมไททานเนต พบว่าที่ความยาวคลื่นแสงสีแดง ความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร ค่าดัชนีหักเหแสงที่เดินทางในโหมดสามัญ (Ordinary light index :  $n_o$ ) เท่ากับ 2.4160 และดัชนีหักเหแสงที่เดินทางในโหมดวิสามัญ (Extraordinary light index :  $n_e$ ) เท่ากับ 2.3630 นำค่าดัชนีหักเหทั้ง 2 แทนลงในสมการจะได้มุมเดี่ยวเบนของลำแสงจากการคำนวณทางทฤษฎี ดังแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ตารางเปรียบเทียบมุมตกกระทบบและมุมเดี่ยวเบนของลำแสง จากการทดลองและการคำนวณทางทฤษฎี

ลำดับ	มุมตกกระทบบ และมุมเดี่ยวเบน (degree)	$\theta_i$	$\theta_{d1}$	$\theta_{d2}$	$\theta_{d3}$
	เกิดลำแสงเดี่ยวเบนอันดับที่ 1 และ อันดับที่ 2 (รูปที่ 4.2 และ รูปที่ 4.3)				
	การคำนวณทางทฤษฎี	-	10.25	32.26	
1.	การทดลองใช้เลเซอร์กำลังแสง 10 mW	10.68	10.22	32.08	
	ความคลาดเคลื่อน (%)	-	0.29 %	0.56 %	
2.	การทดลองใช้เลเซอร์กำลังแสง 25 mW	10.36	10.35	32.41	
	ความคลาดเคลื่อน (%)	-	0.98 %	0.46 %	
	เกิดลำแสงเดี่ยวเบนอันดับที่ 1 อันดับที่ 2 และ อันดับที่ 3 (รูปที่ 4.4)				
	การคำนวณทางทฤษฎี	-	5.90	17.95	30.91
3.	การทดลองใช้เลเซอร์กำลังแสง 25 mW	6.05	5.92	18.04	31.08
	ความคลาดเคลื่อน (%)	-	0.34 %	0.50 %	0.55 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางจะเห็นว่ามุมตกกระทบ  $\theta_i$  กับมุมเลี้ยวเบนอันดับที่ 1  $\theta_{d1}$  มีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งในความเป็นจริงค่าของมุมทั้ง 2 ต้องมีค่าเท่ากัน เพราะลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 เลี้ยวเบนทับกับลำแสงตกกระทบที่ผ่านออกมาจากผลึกตกกระทบบนฉากรับแสง ซึ่งความคลาดเคลื่อนของมุมอาจเกิดมาจากการวัดค่าต่าง ๆ ผิดพลาดเพื่อนำมาใช้คำนวณหามุมตกกระทบและมุมเลี้ยวเบน จากนั้นเปรียบเทียบมุมของลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1  $\theta_{d1}$  และมุมเลี้ยวเบนอันดับที่ 2  $\theta_{d2}$  จากการทดลองโดยใช้เลเซอร์กำลังแสง 10 มิลลิวัตต์ (รูปที่ 4.2) กับการคำนวณทางทฤษฎีพบว่ามีความคลาดเคลื่อนของมุมเท่ากับ 0.29 % และ 0.56 % ตามลำดับ และเปรียบเทียบมุมเลี้ยวเบนอันดับที่ 1  $\theta_{d1}$  และมุมเลี้ยวเบนอันดับที่ 2  $\theta_{d2}$  โดยใช้เลเซอร์กำลังแสง 25 มิลลิวัตต์ (รูปที่ 4.3) กับการคำนวณทางทฤษฎีพบว่ามีความคลาดเคลื่อนของมุมเท่ากับ 0.98 % และ 0.46 % ตามลำดับ ซึ่งเป็นลำแสงเลี้ยวเบนที่มีความเข้มสูงที่สุดในการเกิดลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 และอันดับที่ 2

สุดท้ายเป็นการเปรียบเทียบการเกิดลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 อันดับที่ 2 และอันดับที่ 3 พร้อมกันจากรูปที่ 4.4 โดยใช้เลเซอร์ที่มีกำลังแสง 25 มิลลิวัตต์พบว่ามุมตกกระทบ  $\theta_i$  มีค่าใกล้เคียงกับมุมของลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1  $\theta_{d1}$  มาก แสดงว่ามุมทั้ง 2 เป็นมุมเดียวกันหรือมีค่าเท่ากัน และความคลาดเคลื่อนของมุมเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 อันดับที่ 2 และอันดับที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบกับการคำนวณทางทฤษฎีเท่ากับ 0.34 %, 0.50 % และ 0.55 % ตามลำดับ และลำแสงเลี้ยวเบนอันดับสูงมีแกนโพลาไรซ์ตั้งฉากกับแกนโพลาไรซ์ของลำแสงตกกระทบหรือลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 เช่นเดียวกับการตรวจสอบแกนโพลาไรซ์ของลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.5 แสดงว่าลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 อันดับที่ 2 และอันดับที่ 3 ที่เกิดขึ้นพร้อมกันด้วยมุมตกกระทบ 6.05 องศา โดยใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน แสงสีแดงความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร กำลังแสง 25 มิลลิวัตต์เป็นลำแสงจากการเกิดปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาลำแสงเลี้ยวเบนอันดับสูงด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก (Anisotropic self-diffraction : ASD) ในผลึกแบเรียมไททานเตชันนิกเจือด้วยอะตอมซีเรียม ( $Ce : BaTiO_3$ ) ซึ่งเป็นผลึกแบบทัศนศาสตร์ไม่เชิงเส้น (Nonlinear optic) และมีคุณสมบัติอิเล็กทรอนิกส์ (Electro-optics) โดยใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออนเป็นแหล่งกำเนิดแสงสีแดง ความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร พบว่าเมื่อลำแสง 2 ลำที่มีความเป็นโคฮีเรนต์ตกกระทบและซ้อนทับกันภายในผลึกแสงจะเกิดการกระเจิงภายในผลึก และแทรกสอดกันเกิดเป็นแถบมืด แถบสว่างของแสง ส่งผลให้อะตอมเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ตามแถบการแทรกสอดของแสง ทำให้อิเล็กตรอนหรือประจุพาหะสามารถเคลื่อนที่และสร้างสนามไฟฟ้าที่วางประจุขึ้น จากนั้นผลึกเกิดความไม่สมมาตรทำให้ค่าดัชนีหักเหแสงภายในผลึกแต่ละแกนมีค่าไม่เท่ากัน ( $n_x$  และ  $n_y$ ) จึงเกิดการสร้างเกรตติงเป็นแถบๆ ตามสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้น เรียกว่าปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรคทีฟ (Photorefractive effect) และเมื่อลำแสงตกกระทบ 2 ลำทำมุมกันอย่างเหมาะสม ตามกฎการเลี้ยวเบนของแบรกก์ (Bragg condition) ลำแสงทั้ง 2 สามารถถ่ายโอนพลังงานให้แก่กัน และเลี้ยวเบนผ่านช่องสลิตของเกรตติง โดยแสงลำที่ 1 เลี้ยวเบนผ่านเกรตติงสร้างลำแสงเลี้ยวเบน  $Ke_2$  และแสงลำที่ 2 เลี้ยวเบนผ่านเกรตติงสร้างลำแสงเลี้ยวเบน  $Ke_1$  เกิดเป็นแสง 4 ลำ เรียกว่าปรากฏการณ์การผสมคลื่น 4 ขบวน (Four-wave mixing : FWM) จากนั้นเมื่อลำแสงเกิดการสร้างเฟสแมทซิง โดยมีเวกเตอร์คลื่นเกรตติง  $K_g$  เป็นผลรวมของเวกเตอร์คลื่นเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 ( $Ke_1$  และ  $Ke_2$ ) ถ้าเวกเตอร์คลื่นเกรตติงของลำแสงเลี้ยวเบนอันดับสูงมีค่าเป็นจำนวนเท่าของ  $K_g$  จะเกิดลำแสงเลี้ยวเบนอันดับสูงขึ้น เรียกว่าปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก ซึ่งจะเกิดตามมุมตกกระทบที่เหมาะสมเท่านั้น และในการทดลองไม่สามารถสังเกตเห็นปรากฏการณ์คลื่นเฟสคอนจูเกต (Phase conjugate) ซึ่งเป็นคลื่นที่มีลักษณะเหมือนคลื่นตกกระทบทุกประการ แต่มีทิศทางตรงกันข้าม

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าสามารถสังเกตเห็นลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 และอันดับที่ 2 เกิดขึ้นพร้อมกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 มีความเข้มแสงสูงสุดที่มุมตกกระทบ  $\theta_i$  เท่ากับ 10.36 องศา มุมเลี้ยวเบนอันดับที่ 1  $\theta_{d1}$  เท่ากับ 10.35 องศา และมุมเลี้ยวเบนอันดับที่ 1  $\theta_{d1}$  จากการคำนวณทางทฤษฎี เท่ากับ 10.25 องศา ซึ่งหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของมุมเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 ได้เท่ากับ 0.98 % โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงสีแดง จากเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร กำลังเลเซอร์ 25 มิลลิวัตต์ และเกิดลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 อันดับที่ 2 และอันดับที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พร้อมกันเป็นครั้งแรก ดังแสดงในรูปที่ 4.4 มีความเข้มแสงสูงที่สุดที่มุมตกกระทบ  $\theta_i$  เท่ากับ 6.05 องศา มุมเลี้ยวเบนอันดับที่ 1  $\theta_{d1}$  เท่ากับ 5.92 องศา องศา และมุมเลี้ยวเบนอันดับที่ 1  $\theta_{d1}$  จากการคำนวณทางทฤษฎี เท่ากับ 5.90 องศา ซึ่งหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของมุมเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 ได้เท่ากับ 0.34 % โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงสีแดง จากเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ที่มีกำลังแสง 25 มิลลิวัตต์ จะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างมุมเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 จากการทดลอง กับการคำนวณทางทฤษฎีมีค่าน้อยกว่า 1% แสดงว่าในการทดลองมุมตกกระทบและมุมเลี้ยวเบนของลำแสงเข้าใกล้ค่าทางทฤษฎีมาก หรือการทดลองมีความผิดพลาดน้อยมาก

ในการทดลองสามารถตรวจสอบการเกิดปรากฏการณ์การผสมคลื่น 4 ขบวน (Four-wave mixing) ได้โดยการวางลำแสงตกกระทบ 1 ลำ พบว่าลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 1 ยังคงปรากฏบนฉากรับแสงแต่มีความเข้มของแสงน้อยลง ส่วนลำแสงเลี้ยวเบนอันดับสูงค่อย ๆ จางลงและเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 5 นาทีแสงจะหายไป จากนั้นเมื่อปล่อยลำแสงตกกระทบอีกครั้งลำแสงทั้งหมดกลับมามีความสว่างเท่าเดิม ซึ่งเกิดจากการถ่ายโอนพลังงานแสงให้แก่กัน และลำแสงเลี้ยวเบนแต่ละอันดับเป็นลำแสงที่เกิดจากการปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก เพราะลำแสงเลี้ยวเบนทุกอันดับมีทิศการโพลาไรซ์ตั้งฉากกับทิศการโพลาไรซ์ของลำแสงตกกระทบ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นไปตามกฎการเลี้ยวเบนแบบแอนไอโซโทรปิก (Anisotropic diffraction)

## 5.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต

จากผลการทดลองในวิทยานิพนธ์เล่มนี้แสดงให้เห็นว่ามุมตกกระทบ และมุมเลี้ยวเบนแต่ละอันดับของลำแสงยังคงมีความคลาดเคลื่อนกับค่าที่คำนวณจากทางทฤษฎี ซึ่งอาจเกิดจากความผิดพลาดในการวัดระยะต่าง ๆ ของลำแสง เช่นระยะห่างจากผลึกถึงฉากรับแสง ระยะระหว่างลำแสงเลี้ยวเบนแต่ละอันดับ ระยะการเปลี่ยนตำแหน่งผลึกเพื่อนำมาคำนวณหามุม และสเกลในการวัดระยะการเปลี่ยนตำแหน่งของผลึกยังไม่ละเอียดพอ ดังนั้นในการทดลองควรใช้สเกลวัดระยะที่มีความละเอียดในระดับทศนิยม 2 หรือ 3 ตำแหน่ง เพื่อใช้คำนวณมุมที่มีความละเอียดมากขึ้น นอกจากนี้ในการสังเกตลำแสงเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นเป็นการสังเกตด้วยสายตา และใช้มิเตอร์วัดความเข้มแสงที่มีความเสถียรน้อย เพราะมีความไวต่อความร้อนที่เกิดจากลำแสง ทำให้ค่าความเข้มแสงที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนมีค่าวิ่งขึ้นวิ่งลงในระหว่างการวัด ซึ่งยากต่อการอ่านค่าจึงควรใช้มิเตอร์วัดความเข้มแสงที่มีความละเอียดสูง และไม่ไวต่อความร้อนที่เกิดจากลำแสงเลเซอร์ สิ่งสำคัญควรจัดระบบการทดลองบนโต๊ะที่ไม่มีกรอบการบงกชจากการสั่นสะเทือน เพราะการสั่นสะเทือนไปรบกวนการแทรกสอดของลำแสงและการสร้างเกรตติงภายในผลึก และควรจัดระบบการทดลองให้ลำแสงตกกระทบลำที่ 1 กับลำที่ 2 มีค่าความเข้มแสงที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด เพราะในการทดลองความเข้มของแสงทั้งสองยังมีความแตกต่างกันอยู่ ทำให้ยากต่อการเกิดปรากฏการณ์ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับงานวิจัยในอนาคตสามารถศึกษาลำแสงเลี้ยวเบนอันดับที่สูงขึ้นอีก เช่น อันดับที่ 4 อันดับที่ 5 และทดลองเพื่อสังเกตลำแสงเลี้ยวเบนให้มีความเข้มแสงสูงกว่าเดิม มีมุมตกกระทบที่ใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีมากที่สุด จากนั้นเปลี่ยนตัวกลางที่ใช้ศึกษาเป็นวัสดุพอลิเมอร์แล้วจ่ายสนามไฟฟ้าให้กับตัวกลางเพื่อกระตุ้นให้อะตอมภายในพอลิเมอร์สามารถจัดเรียงตัวกันใหม่ และสามารถสร้างเกรตติงได้ หรืออาจจะใช้ลำแสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันเพื่อเปรียบเทียบมุมตกกระทบและมุมเลี้ยวเบนของลำแสงที่เกิดขึ้นว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่ นอกจากนี้ใช้ลำแสงเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นซึ่งมีทิศการโพลาไรซ์ตั้งฉากกับทิศการโพลาไรซ์ของลำแสงตกกระทบ เพื่อเปรียบเทียบภาพของวัตถุ ระหว่างภาพที่เกิดจากการส่องสว่างด้วยลำแสงตกกระทบ กับภาพที่ส่องสว่างด้วยลำแสงเลี้ยวเบน เรียกวิธีการนี้ว่าความสัมพันธ์ทางแสง (optical correlation)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Pochi Yeh, **Introduction to photorefractive nonlinear optics**, John Wiley and Sons, New York, (1993).
- [2] N. V. Kukhtarev, E. Kratzing, H. C. Kulich, and R. A. Rupp, “**Anisotropic self diffraction in BaTiO<sub>3</sub>**”, Appl. Phys. B **35**, 17 – 21 (1984).
- [3] Doyle A. Temple and Cardinal Warde, “**Anisotropic scattering in photorefractive crystals**”, Vol. 3, No.2/February 1986/J. Opt. Soc. Am. B.
- [4] D.A.Temple and C. Warde, “**High-order anisotropic diffraction in photorefractive crystals**”, J.Opt.Soc.Am. B/Vol.5, No.8/August 1988.
- [5] Changxi Yang, Yuheng Zhang, Pochi Yeh, Yong Zhu and Xing Wu, “**Photorefractive properties of Ce: BaTiO<sub>3</sub> crystals**”, Optics communications 113 (1995) 416-420.
- [6] Yongyuan Jiang, Xiudong Sun, Zhongxiang Zhou, Baohong Yuan, and Yan Li, “**Coupled wave analysis of anisotropic self-diffraction in photorefractive materials with an external electric field**”, Optics Communications 184 (2000) 315-320.
- [7] Robert W. Boyd, **Nonlinear optics 3<sup>rd</sup> Ed**, Academic Press, USA, 2008.
- [8] Prathan Buranasiri, “**Coherent and incoherent self-imaging using a photorefractive barium titanate crystal**”, Huntsville, Alabama, 2001
- [9] <http://www.optics.arizona.edu/pablanche/Photorefractive.htm>
- [10] <http://www.intalek.com/Index/Projects/Research/gloss.htm>
- [11] <http://www.flickr.com/photos/7461930@N06/1157502185/>
- [12] <http://www.sciencephoto.com/media/92635/enlarge>
- [13] [http://www.mne.eng.psu.ac.th/staff/lek\\_files/ceramic/u1-7.htm](http://www.mne.eng.psu.ac.th/staff/lek_files/ceramic/u1-7.htm)
- [14] <http://www.sjsu.edu/faculty/selvaduray/page/papers/mate115/hsiaolin.pdf>
- [15] Jaime Frejlich, **Photorefractive materials (Fundamental concepts, Holographic recording and Materials characterization)**, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2007.
- [16] David J. Griffiths, **Introduction to quantum mechanics**, Pearson Education Inc., 2005.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# 2012 Photonics West<sup>®</sup>

21–26 January 2012

**Technical Program**  
[spie.org/pw12](http://spie.org/pw12)

#### Location

The Moscone Center  
 San Francisco, California, USA

#### Conference dates

21–26 January 2012

#### Exhibition dates

BIOS Expo:  
 21–22 January  
 Photonics West:  
 24–26 January

#### Technologies

- BIOS  
 - OPTO  
 - LASE  
 - MOEMS-MEMS  
 - Green Photonics



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Multi high-order anisotropic self-diffraction in Cerium doped BaTiO<sub>3</sub> crystal

S. Plaipichit, P. Buranasiri\*, R. Nuansri, W. Neeyakorn.

Physics Department, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology  
Ladkrabang Bangkok, Thailand, 10520

## ABSTRACT

Higher-order anisotropic self-diffraction up to third orders have been observed in Cerium doped barium titanate by using red beam at 633 nm from He-Ne laser. In our experiment, the third orders and second orders have been observed simultaneously for the first time from our knowledge. From our observation, the phase conjugate beam has not been generated before and after the appearance of higher orders as observing when the green beam from the Argon-ion laser at 514.5 nm has been used. The diffraction efficiency and the decay rate of the grating have been measured as well in the red light case

**Keywords:** BaTiO<sub>3</sub>, anisotropic self diffraction, photorefractive effect, higher order

## 1. INTRODUCTION

The Photorefractive (PR) effect has been interested since its accident discovery by Ashkin *et. al.* in 1966<sup>1</sup>. Recently, the PR effect have been observed in a number of medias such as LiNbO<sub>3</sub>, BaTiO<sub>3</sub>, GaAs, multi quantum well materials, and some organic and polymer materials. The use of PR effect has resulted in numerous applications such as phase conjugation, optical correlation, dynamic holography, optical pattern recognition, optical converter, etc<sup>2-11</sup>. One of several optical schemes, which has been used in those application above is anisotropic self diffraction (ASD). ASD has been first found in BaTiO<sub>3</sub> crystal<sup>12</sup>. One feature of ASD is the different of polarization of relate beams on PR crystal. The polarization of the incident beams is perpendicular to that of the incident beam, *i.e.* the incident beam is ordinary light and diffracted light is extra-ordinary light.

In this paper, a new kind of anisotropic self-diffraction in cerium doped barium titanate crystal (BaTiO<sub>3</sub>:Ce) has been reported. From the best of our knowledge, two higher orders of diffract beams have been observed in the same time for the first time, which is different from that have been observed only one higher orders which have been reported so far.

## 2. THEORIES

### 2.1 PHOTOREFRACTIVE EFFECT

The photorefractive (PR) effect is a kind of nonlinear optic phenomena, which occurs in the electro-optics materials. In PR materials, the local index of refraction can be changed, when the light beams has been interfere on their surfaces. By assume that the PR media are doped, their donor impurities can be ionized when they have been absorbed photons. Let the density of donor impurities be  $N_D$  and  $N_D^i$ , which are their ionized. Then, the rate of electron generation is  $(sI + \beta)(N_D - N_D^i)$  and the rate of trap capture is  $\gamma_R N N_D^i$ , where  $N$ ,  $s$ ,  $I$ ,  $\beta$  and  $\gamma_R$  are electron density, cross section for

\*kbprra@kmit.ac.th; phone +66 329 8400-8411; fax +66329 8412

photoexcitaton, light intensity, rate of thermal generation of electron and electron-ionized trap recombination rate, respectively. By the value of  $\beta$  is infinitesimal compare to  $sI$ , the rate equation for  $N_D^i$  can be written as

$$\frac{\partial N_D^i}{\partial t} = sI(N_D - N_D^i) - \gamma_R N N_D^i \quad (1)$$

Because of mobility of electron can be affect the electron density, now, the rate equation can be written as

$$\frac{\partial N}{\partial t} - \frac{\partial N_D^i}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{j} \quad (2)$$

where  $q$  is an electron charge and  $\mathbf{j}$  is a current density, which consists of contributions from the drift of charge due to an electric field and the diffusion due to the gradient of carrier density. Thus, this can be written as

$$\mathbf{j} = qN\mu\mathbf{E} + k_B T \mu \nabla N \quad (3)$$

where  $\mu$  is the mobility tensor,  $\mathbf{E}$  is the electric field,  $k_B T$  is the product of the Boltzmann constant and temperature. The electric field is followed by Poisson equation:

$$\nabla \cdot \epsilon \mathbf{E} = \rho(\mathbf{r}) = -q(N + N_A - N_D^i) \quad (4)$$

where  $\epsilon$  is dielectric tensor,  $\rho(\mathbf{r})$  is charge density and  $N_A$  is density of acceptor impurity. The Eqs (1) – (4) have been called band transport model<sup>13</sup> or Kukhtarev's Equations

## 2.2 RAMAN-NATH DIFFRACTION



Figure 1. (a) multiple scattering are forbidden; (b) Multiple scattering are allowed.

In Bragg diffraction, the two incident waves at Bragg angle is diffracted by grating with change of momentum. In the case of infinite grating, the diffracted wave cannot get scatter at larger angle because the conservation of energy and momentum cannot be satisfied. The wave vector 0 represents the incident wave and wave vector 1 represents the diffracted wave. To scattered again with the same change of wave vector  $K$ , the momentum conservation cannot be satisfied as shown in figure 1(a). In the other case, finite grating, multiple diffraction process which involve gratings with slightly difference wave vector because both energy and momentum are conserve as see in figure 1(b). The diagram of Raman-Nath regime with multiple diffraction order is shown in Figure 2.

To determine the latter case, the electric field of incident optical wave is represented by

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp[i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})] \quad (5)$$

this wave is incident onto the thin sheet of grating at  $x = 0$  and the electric field of transmitted wave can be written as<sup>13</sup>

$$\mathbf{E}_t = \mathbf{E}_0 \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(\delta) (-i)^m \exp[i(\omega t - \mathbf{k}_m \cdot \mathbf{r})] \quad (6)$$

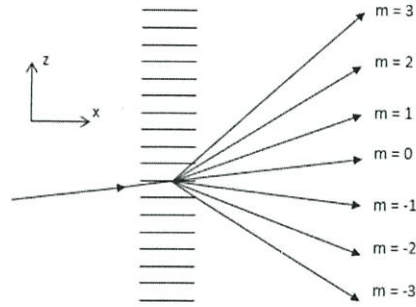


Figure 2. Raman – Nath diffraction

where  $\mathbf{k}_m$  is the wave vector of the  $m$ th diffraction beam which can be defined by

$$k_{mz} = k_z + mK_z \quad (7)$$

$$k_{mx} = \left[ \left( \frac{\omega}{c} \right)^2 - k_{mz}^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

where the subscripts  $x$  and  $z$  indicate  $x$ - and  $z$ - of the corresponding vectors.  $J_m(\delta)(-i)^m$  is the amplitude of the  $m$ th order diffracted beam. The diffraction efficiency for the  $m$ th order of Raman-Nath diffraction is given by

$$\eta_m = J_m^2(\delta) = J_m^2 \left( \frac{2\pi L n_1}{\lambda \cos \theta} \right) \quad (9)$$

where  $L$  is interaction length,  $n$  is index of refraction and  $\lambda$  is wave length of incident wave. In addition, the sum of intensities of diffraction orders must be equal to the intensities of incident beam thus the energy is conserved.

### 2.3 ANISOTROPIC SELF DIFFRACTION

In an anisotropic bulk crystal, the phase matching conditions need to be satisfied by the writing beams (incident beams) to create the anisotropic self diffraction. As shown in Figure 3, the optical axis is in the direction parallel to the plane of incident. Here,  $\mathbf{K}_{e1}$  and  $\mathbf{K}_{e2}$  are the wave vector of two writing beams with extraordinary polarization.  $\mathbf{K}_{o1}$  and  $\mathbf{K}_{o2}$  are the wave vector of diffracted beams with direction of polarization perpendicular to  $c$ -axis (ordinary polarization). Here,  $\mathbf{K}_g$  is the grating wave vector defined by

$$\mathbf{K}_g = \mathbf{K}_{e2} - \mathbf{K}_{e1} \quad (10)$$

Now, the wave vectors of the diffracted higher order beams can be written as

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_{o1} &= \mathbf{K}_{e1} - \mathbf{K}_g, \\ \mathbf{K}_{o2} &= \mathbf{K}_{e2} + \mathbf{K}_g \end{aligned} \quad (11)$$

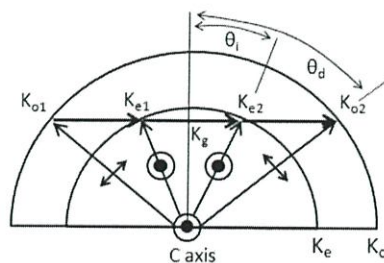


Figure3. The wave vector diagram of anisotropic self diffraction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The incident and diffraction angles both inside and outside crystal can be expressed as<sup>14</sup>

$$\begin{aligned}\theta_i &= \sin^{-1} \left[ \frac{1}{n_e} \left( \frac{n_o^2 - n_e^2}{8} \right)^{1/2} \right], \\ \theta_d &= \sin^{-1} \left[ \frac{3}{n_e} \left( \frac{n_o^2 - n_e^2}{8} \right)^{1/2} \right], \\ \theta_{io} &= \sin^{-1} \left[ \left( \frac{n_o^2 - n_e^2}{8} \right)^{1/2} \right], \\ \theta_{do} &= \sin^{-1} \left[ 3 \left( \frac{n_o^2 - n_e^2}{8} \right)^{1/2} \right],\end{aligned}\quad (12)$$

respectively, where  $n_o$  is the ordinary refractive index and the  $n_e$  is extraordinary refractive index of the crystal. Furthermore, under Bragg condition as shown in Figure 3, the incident light  $\mathbf{K}_{e1}$  and  $\mathbf{K}_{e2}$  not only construct the grating  $\mathbf{K}_g$  but also couple to second order beams,  $\mathbf{K}_{o1}$  and  $\mathbf{K}_{o2}$ , respectively. This is the regime of anisotropic self-diffraction.

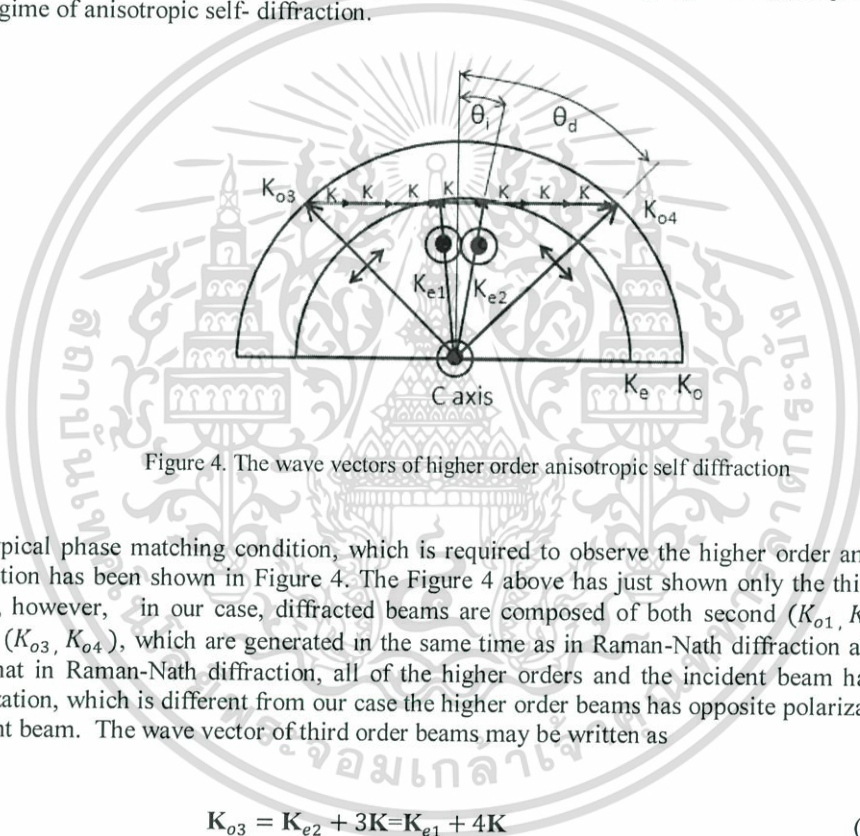


Figure 4. The wave vectors of higher order anisotropic self diffraction

The typical phase matching condition, which is required to observe the higher order anisotropic self diffraction has been shown in Figure 4. The Figure 4 above has just shown only the third and fourth orders, however, in our case, diffracted beams are composed of both second ( $K_{o1}, K_{o2}$ ) and third orders ( $K_{o3}, K_{o4}$ ), which are generated in the same time as in Raman-Nath diffraction above. Please note that in Raman-Nath diffraction, all of the higher orders and the incident beam have the same polarization, which is different from our case the higher order beams has opposite polarization with the incident beam. The wave vector of third order beams may be written as

$$\mathbf{K}_{o3} = \mathbf{K}_{e2} + 3\mathbf{K} = \mathbf{K}_{e1} + 4\mathbf{K} \quad (13)$$

In general, order of anisotropic self diffraction  $M$  occurs in pair of  $-M$  and  $M+1$ . Thus, phase matching condition can be expressed by<sup>15</sup>

$$\begin{aligned}\sin \theta_i &= \left[ \frac{n_o^2 - n_e^2}{(2M+1)^2 - 1} \right]^{1/2}, \\ \sin \theta_d &= (2M + 1) \left[ \frac{n_o^2 - n_e^2}{(2M+1)^2 - 1} \right]^{1/2},\end{aligned}\quad (14)$$

where  $\theta_i$  and  $\theta_d$  are the angle outside the crystal of writing and diffracted beams, respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. EXPERIMENTAL SETUP, OBSERVATION AND RESULTS

The experimental setup is shown in Figure. 5. He-Ne laser with wavelength 633 nm has been used as the light source. Two beams with extraordinary polarization separated from the original beam by a beam splitter have been incident overlap on each other on a surface of Ce:BaTiO<sub>3</sub> crystal of dimensions 6 mm x 6 mm x 6.5 mm (a x b x c). The polarization of the incident beams is the same direction with the c-axis of the crystal. In order to adjust intensity ratio between two incident beams, two filters have been placed in front of the crystal. To satisfy the Bragg condition and investigate the generation of the anisotropic self diffraction, the angle between two beams and their intensity ratio have been varied. The distance between crystal and screen, which is a white thin paper has been fixed at 15 cm. The CCD camera has been used to capture the image pattern of the diffracted light. Furthermore, we have used a polarizer to check the polarization of the diffracted higher order beams to be sure that the diffracted higher order beams is anisotropic self diffraction.

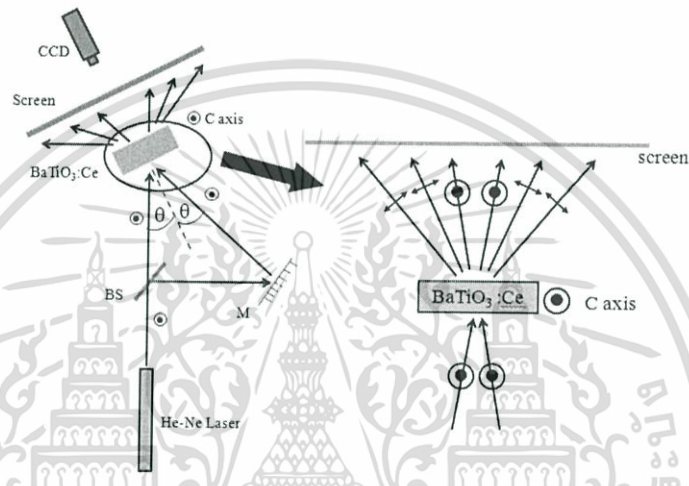


Figure 5. Experimental setup. BS is beam splitter; M is mirror; PF is polarizer.

Figure 6 shows the second order of anisotropic self diffraction. The diffracted beams, which their directions of polarization are perpendicular to the incident beams have been generated near the Bragg angle condition. However, intensity of this diffraction will be increased to maximum value at the angle between the incident beams is equal to 11.85 degree. The two first order beams, at the middle of the diffraction pattern have been composed of ordinary beams of transmitted light and extraordinary beams of the diffraction from the opposite incident beam. At smaller angle (6.67 degree) with Bragg condition, the third order beams have been observed. Furthermore, as shown in Figure 7, there are two diffracted higher order beams, second order beams and third order beams have been observed simultaneously. From our observation, the intensity of the ASD with more higher orders is less than the intensity of ASD with fewer higher orders as shown in the Figure 6 and 7. Please note that we have observed that the phase conjugate beam has not been generated during the higher order beams have been observed with different from the case that the green light from Ar<sup>+</sup> ion laser has been used.

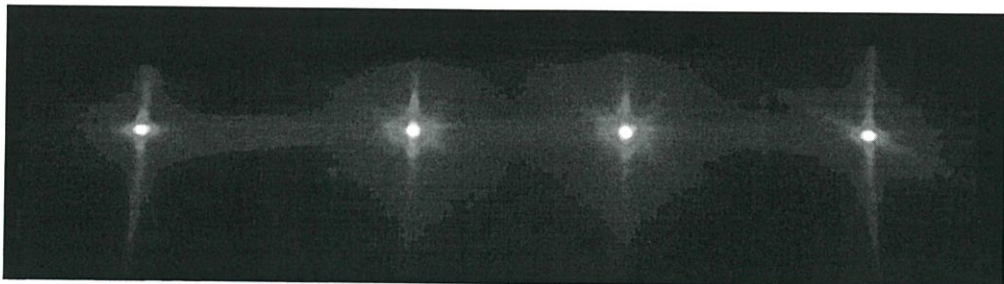


Figure 6. The anisotropic self diffraction up to second orders

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Figure 7. Higher orders of the anisotropic self diffraction up to third orders

#### 4. CONCLUSION

We have observed higher order anisotropic self-diffraction in  $\text{BaTiO}_3:\text{Ce}$ . Three distinct higher orders have been noticed in the same time. Also, it has been found that the light at the position of the first order beams composed of both extraordinary light and ordinary light. The phase conjugate beam, which always has been generated before the higher orders shown up, when the green light have been used have not been observed with red light.

#### REFERENCES

- [1] A. Ashkin, G. D. Boyd, J. M. Dziedzic, R. G. Smith, A. A. Ballman, J. J. Levinstein, and K. Nassau, "Optically Induced Refractive Index Inhomogeneities in  $\text{LiNbO}_3$  and  $\text{LiTaO}_3$ ," *Appl. Phys. Lett.* **9**, 72-74 (1966)
- [2] Sze-Keung Kwong, Amnon Yariv, Mark Cronin-Golomb, and Baruch Fischer, "Phase of phase conjugation and its effect in the double phase-conjugate resonator," *J. Opt. Soc. Am. A* **3**, 157-160 (1986)
- [3] San-Ching De La Cruz, Stuart MacCormack, Jack Feinberg, Q. Byron He, Hua-Kuang Liu, and Pochi Yeh, "Effect of beam coherence on mutually pumped phase conjugators," *J. Opt. Soc. Am. B* **12**, 1363-1369 (1995)
- [4] A. M. C. Smout and R. W. Eason, "Analysis of mutually incoherent beam coupling in  $\text{BaTiO}_3$ ," *Opt. Lett.* **12**, 498-500 (1987)
- [5] X. Wang, R. Magnusson, and A. Haji-Sheikh, "Real-time interferometry with photorefractive reference holograms," *Appl. Opt.* **32**, 1983-1986 (1993)
- [6] Pochi Yeh, Tallis Y. Chang, and Paul H. Beckwith, "Real-time optical image subtraction using dynamic holographic interference in photorefractive media," *Opt. Lett.* **13**, 586-588 (1988)
- [7] M. Vaupel, C. Seror, and R. Dykstra†, "Self-focusing in photorefractive two-wave mixing," *Opt. Lett.* **22**, 1470-1472 (1997)
- [8] Abtine Tavassoli and Michael F. Becker, "Optical Correlation of Spatial-Frequency-Shifted Images in a Photorefractive BSO Correlator," *Appl. Opt.* **43**, 1695-1702 (2004)
- [9] Hua-Kuang Liu, "Self-amplified optical pattern-recognition technique," *Appl. Opt.* **31**, 2568-2575 (1992)
- [10] Ching-Cherng Sun, Bor Wang, and Jenq-Yang Chang, "Photorefractive Incoherent-to-Coherent Optical Converter Based on Anisotropic Self-Diffraction in  $\text{BaTiO}_3$ ," *Appl. Opt.* **37**, 8247-8253 (1998)
- [11] Y. Shi, D. Psaltis, A. Marrakchi, and A. R. Tanguay, Jr., "Photorefractive incoherent-to-coherent optical converter," *Appl. Opt.* **22**, 3665-3667 (1983)
- [12] N. V. Kukhtarev, E. Krazig, H. C. Kulich, and R. A. Rupp, "Anisotropic self-diffraction in  $\text{BaTiO}_3$ ," *Appl. Phys. B* **35**, 17-21 (1984)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13]Pochi Yeh, [Introduction to photorefractive nonlinear optics], Wiley Interscience, New York, (1993)
- [14]Bor Wang and Ching-Cherng Sun, "Precise Measurement of Thermal-Induced Refractive-Index Change in BaTiO<sub>3</sub> on the Basis of Anisotropic Self-Diffraction," Appl. Opt. **40**, 672-677 (2001)
- [15]D. A. Temple and C. Warde, "High-order anisotropic diffraction in photorefractive crystals," J. Opt. Soc. Am. B **5**, 1800-1805 (1988)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The 7<sup>th</sup> Science and Technology Conference for Youths

เชิญเข้าร่วม

งานประชุมวิชาการ

**วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**  
เพื่อเยาวชน ครั้งที่ 7

ร่วมจัดงานโดย

ในหัวข้อ  
**เยาวชนวิทย์ คัด-เรียนรู้ อยู่กับธรรมชาติ**

พบกับกิจกรรม...

- ▶ **เสวนาทางวิชาการ** จากผู้เชี่ยวชาญด้านตน นวัตกรรม และกับ รุ้ง รุ่ง flood
- ▶ **บรรยายพิเศษ** โดย...เนทวีย์ เช่นนี้
- ▶ **นำเสนอผลงานวิจัย** แบบบรรยาย / โปสเตอร์
- ▶ **นิทรรศการแสดงผลงานวิจัย** ตามรอยเส้นทางนักวิทยาศาสตร์ นวัตกรรมของไทย
- ▶ **นำเสนอหลักสูตร** แนวทางการศึกษาต่อ ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
- ▶ **สนุกกับกิจกรรมเชิงปฏิบัติ** ต่างๆ
- ▶ **ประลองความคิดทางวิทยาศาสตร์** กับ mini 3x3 สปริงเกอร์

วันที่ **2-4**  
**พฤษภาคม**  
**2555**

พบกันที่  
ศูนย์นิทรรศการและการประชุม  
**ไบเทค** บางนา  
กรุงเทพฯ

สาขา NSTDA

**ฟรี**  
ไม่เสียค่าใช้จ่าย

สอบถามรายละเอียดได้ที่  
**โทร. 0 2392 4021**  
ต่อ 2314 , 2316 , 2318

Official Web site  
<http://stt4youth.ipst.ac.th>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลี้ยวเบนอันดับสูงด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิกในผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม

ฤทธิรงค์ นวลศรี,<sup>1</sup> และ ประธาน บุราณศิริ

<sup>1</sup>ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จ.กรุงเทพฯ 10520

Email address: [kmitl.apl@gmail.com](mailto:kmitl.apl@gmail.com)

โทรศัพท์ 0836010604

**บทคัดย่อ:** การเกิดแสงเลี้ยวเบนอันดับสูง (อันดับที่ 2 และ 3) ของปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก ซึ่งเป็นปรากฏการณ์หนึ่งที่มีผลจากปรากฏการณ์โฟโตรีเฟรกทีฟ ในวัสดุที่มีคุณสมบัติทางทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น โดยในการทดลองใช้ผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยซีเรียม และใช้แหล่งกำเนิดแสงสีแดงความยาวคลื่น 633 นาโนเมตรจากเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ซึ่งในการทดลองเราได้สังเกตแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 2 มีความเข้มแสงมากที่สุดที่มุมตกกระทบ 11.85 องศา และเกิดแสงเลี้ยวเบนอันดับที่ 2 และ 3 พร้อมกันเป็นครั้งแรก มีความเข้มแสงมากที่สุดที่มุมตกกระทบ 6.67 องศา

**คำสำคัญ:** การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก, ปรากฏการณ์โฟตรีเฟรกทีฟ, การเลี้ยวเบนอันดับสูง

Multi higher-order anisotropic self-diffraction in cerium doped barium titanate crystal

Rittirong Nuansri,<sup>1</sup> and Prathan Buranasiri

<sup>1</sup>Applied physics program, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 10520

Email address: [kmitl.apl@gmail.com](mailto:kmitl.apl@gmail.com)

Tel. 0836010604

**Abstract:** In this thesis, the multi higher-order anisotropic self-diffraction from photorefractive (PR) cerium doped barium titanate crystal (Ce: BaTiO<sub>3</sub>) has been investigated both in theoretical and experimental. In our experimental setup, the light at wavelength 633 nm from He-Ne laser has been incident on PR Ce: BaTiO<sub>3</sub>. From our observation, the second diffracted orders have been generated at the highest intensity with the angle 11.85 degree, while, in the first time of our knowledge, the second orders and the third orders diffraction have been generated simultaneously at the highest intensity with the angle 6.67 degree.

**Keyword:** anisotropic self diffraction, photorefractive effect, higher order-diffraction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายฤทธิรงค์ นวลศรี
วัน/เดือน/ปีเกิด	21 กรกฎาคม พ.ศ. 2527
ที่อยู่ปัจจุบัน	83 หมู่ 9 ต.พุดเตียว อ.เขาพนม จ.กระบี่ 81140
ประวัติการศึกษา	จบการศึกษาระดับประถมศึกษา และระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจาก โรงเรียนบ้านบางเหรียญ ต.พุดเตียว อ.เขาพนม จ.กระบี่ (ปีการศึกษา 2533-2542) จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนอำมาตย์ พานิชนุกูล ต.ปากน้ำ อ.เมือง จ.กระบี่ (ปีการศึกษา 2543-2545) วิทยาศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับ 2) สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์- เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร (ปีการศึกษา 2546-2549)
ประสบการณ์ทำงาน	วิศวกรบริการ และผู้ช่วยผู้จัดการฝ่ายวิชาการ ห้างหุ้นส่วนจำกัด ซีจี เอ็นจีเนียร์ริ่ง ถ.ลาดพร้าว แขวงจอมพล เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร (พ.ศ. 2551-2552)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้