

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เฟสคอนจูเกตจากผลึกแบเรียมไททานเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม

ที่ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร

Optical Phase Conjugate from cerium doped barium titanate
at wavelength 632.8 nm

นายธรรมรัตน์ แต่งตั้ง

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจาก เงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เฟสคอนจูเกตจากผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม

ที่ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร

Optical Phase Conjugate from cerium doped barium titanate
at wavelength 632.8 nm

นายธรรมรัตน์ แต่งตั้ง

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 143542

วันเดือนปี 17 ส.ค. 2559

12794399
.b.....
.i.....

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจาก เงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

· เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) เฟสคอนจูเกตจากผลึกแบเรียมไททานตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียมที่ความยาวคลื่น
632.8 นาโนเมตร

แหล่งเงิน เงินรายได้ประเภทส่งเสริมนักวิจัย

ประจำปีงบประมาณ 2556 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2555 ถึง กันยายน 2556

ชื่อ - สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุหน่วยงานต้นสังกัด

หัวหน้าโครงการ นายธรรมรัตน์ แต่งตั้ง

บทคัดย่อ

เฟสคอนจูเกชันเชิงแสง เป็นปรากฏการณ์หนึ่งที่มีผลมาจากปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ ซึ่งที่ผ่านมามีการทดลองเพื่อศึกษาการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงโดยใช้ผลึกแบเรียมไททานตซึ่งเจือด้วยเหล็ก จากการทดลองพบว่าสามารถเกิดปรากฏการณ์ได้ยาก จึงได้ทำการเจือซีเรียมในผลึกแบเรียมไททานต ผลที่ได้พบว่าสามารถเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงได้ง่ายเมื่อใช้เลเซอร์ในช่วงแสงสีเขียว แต่เมื่อใช้เลเซอร์ในช่วงแสงสีแดงนั้นไม่เกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงแต่เกิดเป็นลำแสงเลี้ยวเบนอันดับสูงของปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิกขึ้นแทน

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองใช้ผลึกแบเรียมไททานตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียมและใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตรจากเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน โดยการทดลองใช้เรโซเนเตอร์สองชนิด ซึ่งจากการทดลองเราได้สังเกตการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสง โดยมีความเข้มแสงมากที่สุดที่มุมตกกระทบ 37.23° และ 37.44° และมีค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนของเฟสคอนจูเกชันเชิงแสง $5.379 \times 10^{-3}\%$ และ 0.240% จากเรโซเนเตอร์ชนิดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยใช้เวลาในการเกิดปรากฏการณ์จนมีความเข้มแสงมากที่สุด คือ 17 นาที และ 15 นาที ตามลำดับ

คำสำคัญ : ผลึกแบเรียมไททานตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม,เฟสคอนจูเกชันเชิงแสง,ปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Optical Phase Conjugate from cerium doped barium titanate at wavelength
632.8 nm

Researcher: Thammarat Taengtang

Faculty: Science Department: Physics

ABSTRACT

In this thesis, optical phase conjugate beam with the using of different resonator configurations has been investigate. Two types of SPPC resonators were selected to use, the first one is linear resonators formed by crystal surface and the other one is linear resonators formed by single mirror and a photorefractive crystal. In our experiment, cerium doped barium titanate crystal (Ce:BaTiO_3) and He-Ne laser with wavelength of 632.8 nm have been used. From the results of both cases, the angle of the incident beams is optimum at 37.23° and 37.44° respect to the normal line of the surface that parallel to the c-axis of the crystal. The generating time of OPC beam are 17 minute and 15 minute for the first and second type resonators, respectively. The reflection ratios are equal to $5.379 \times 10^{-3}\%$ and 0.240% for the first and second type resonators, respectively (the second type resonators could provide better reflection ratio).

Keywords : Ce:BaTiO₃ , optical phase conjugation, photorefractive effect

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับการทำวิจัยจาก Photon Dynamic Lab ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง นอกจากนี้ การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนเงินรายได้ประเภทส่งเสริมวิจัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

นายธรรมรัตน์ แต่งตั้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ	iv
สารบัญรูป.....	vi
สารบัญตาราง.....	viii
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น.....	5
2.2 ปรากฎการณ์โพโตรีแฟรกทีฟ.....	7
2.2.1 แบบจำลองการเคลื่อนย้ายประจุระหว่างแถบพลังงาน.....	8
2.2.2 การเดินทางของคลื่นแสงในตัวกลางแบบเป็นคาบ.....	16
2.2.3 ปรากฎการณ์การผสมคลื่นในตัวกลางโพโตรีแฟรกทีฟ.....	20
2.2.3.1 ปรากฎการณ์ผสมคลื่น 2 ขบวน.....	20
2.2.3.2 ปรากฎการณ์ผสมคลื่น 4 ขบวน.....	21
2.3 ปรากฎการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสง.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1ปรากฏการณ์ Beam Fanning.....	27
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	28
3.1 ศึกษาคุณสมบัติของผลึก.....	28
3.1.1 ผลึกแบเรียมไททาเนต.....	29
3.1.2 ผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม.....	31
3.2 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง.....	35
3.2.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	35
3.2.2 การจกระบบการทดลอง.....	36
3.3 ขั้นตอนการทดลองการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูกันเชิงแสง.....	37
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	40
4.1 มุมตกกระทบของลำแสงจากปรากฏการณ์เฟสคอนจูกันเชิงแสง.....	40
4.2 ภาพลำแสงของปรากฏการณ์เฟสคอนจูกันเชิงแสง.....	61
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	64
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	64
เอกสารอ้างอิง.....	65
ภาคผนวก.....	66
ภาคผนวก ก สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย.....	67
ข้อมูลประวัติผู้วิจัย.....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการดูดกลืนโฟตอนของอิเล็กตรอนเข้าสู่แถบนำกระแส ด้วยแบบจำลองการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีเฟรกทีฟ.....	8
2.2 แสดงกระบวนการสร้างดัชนีเกรตติงด้วยการแทรกสอดของคู่ลำแสงตกกระทบที่มีความเข้มแสงแบบเป็นคาบลงบนตัวกลางแบบอเนกโทรอปติกส์	12
2.3 แสดงการกระเจิงของคลื่นระนาบจากแสงเอกรงค์ลงบนตัวกลางแบบเป็นคาบ.....	18
2.4 แสดงการเลี้ยวเบนแสงในตัวกลางแบบเป็นคาบจากเกรตติงแบบบาง.....	19
2.5 แสดงการผสมคลื่นสองขบวน (Two-Wave Mixing).....	20
2.6 แสดงการกระเจิงของแบรกก์เนื่องจากเกรตติงแบบหนาในตัวกลางโฟโตรีเฟรกทีฟ.....	21
2.7 แสดงการผสมคลื่นสี่ขบวน (Four -Wave Mixing).....	22
2.8 แสดงปรากฏการณ์การผสมคลื่น 4 ขบวนในตัวกลางโฟโตรีเฟรกทีฟ.....	23
2.9 แสดงหลักการพื้นฐานของเทคนิค การปรับหน้าคลื่นแสง (Adaptive optics)	25
2.10 แสดงการเปรียบเทียบ คุณสมบัติการสะท้อนของกระจกธรรมดา(Ordinary Mirror) กับกระจกเฟสคอนจูเกต (Phase Conjugate Mirror).....	26
2.11 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของ PCM กับ กระจกแบบธรรมดา เมื่อคลื่นตกกระทบเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางซึ่งบิดเบือน.....	27
2.12 แสดงลำแสงเมื่อเดินทางผ่านผลึกโฟโตรีเฟรกทีฟ (η) ขณะที่ยังไม่เกิด Beam fanning (χ) ขณะเกิด Beam fanning ซึ่งทำให้ลำแสงที่ส่งผ่านออกมามีความเข้มลดลง.....	28
2.13 แสดงลำแสงขณะเกิดปรากฏการณ์ Beam fanning.....	28
3.1 แสดง η โครงสร้างผลึกแบเรียมไททาเนต เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต χ โครงสร้างผลึกแบเรียมไททาเนต เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต	30
3.2 แสดงกราฟการดูดกลืนแสงของผลึกแบเรียมไททาเนตที่ไม่ได้เติมอะตอมของสารเจือกับผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม	31
3.3 แสดงกราฟการดูดกลืนแสงของผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียมที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ	32
3.4 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ถุกเหนี่ยวนำของผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียมกับความเข้มแสงโดยใช้แสงความยาวคลื่น 514 นาโนเมตร.....	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5	แสดงแผนภาพการจัดอุปกรณ์การทดลองสำหรับเรโซเนเตอร์แบบที่ 1.....	37
3.6	แสดงแผนภาพการจัดอุปกรณ์การทดลองสำหรับเรโซเนเตอร์แบบที่ 2.....	37
3.7	แสดงการปรับระยะผลึกด้วยรางเลื่อนในแกน x และ แกน y.....	38
4.1	แสดงผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม (Ce:BaTiO ₃) ที่ใช้ในการทดลอง ก) เมื่อไม่มีแสงตกกระทบผลึก ข) เมื่อส่องสว่างลำแสงตกกระทบผลึก.....	39
4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า PC Reflectivity กับมุมตกกระทบของลำแสงโดยใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 1.....	49
4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า PC Output กับมุมตกกระทบของลำแสงโดยใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 1.....	49
4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า PC Reflectivity กับมุมตกกระทบของลำแสงโดยใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 1	55
4.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า PC Output กับมุมตกกระทบของลำแสงโดยใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 1.....	55
4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเกิดปรากฏการณ์กับค่า PC Output ก) จากเรโซเนเตอร์ชนิดที่ 1 และ ข) จากเรโซเนเตอร์ชนิดที่ 2	60
4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเกิดปรากฏการณ์กับค่า PC Reflectivity ก) จากเรโซเนเตอร์ชนิดที่ 1 และ ข) จากเรโซเนเตอร์ชนิดที่ 2	60
4.8	แสดงลำแสงจากปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงโดยเรโซเนเตอร์แบบที่ 1.....	61
4.9	แสดงลำแสงจากปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงโดยเรโซเนเตอร์แบบที่ 2	61
4.10	แสดงลำแสงจากปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงโดยเรโซเนเตอร์แบบที่ 1 จากตารางที่ 4.3 ที่มุมเฉลี่ย 37.23 องศา	62
4.11	แสดงลำแสงจากปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงโดยเรโซเนเตอร์ชนิดที่ 2 จากตารางที่ 4.4 ที่มุมเฉลี่ย 37.44 องศา	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.2 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของผลึกแบเรียมไททานเต.....	33
3.2 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของผลึกแบเรียมไททานเตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม.....	34
4.1 (ก)แสดงมุมตกกระทบของลำแสงโดยใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 1 การทดลองครั้งที่ 1.....	41
4.1 (ข)แสดงมุมตกกระทบของลำแสงโดยใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 1 การทดลองครั้งที่ 2.....	43
4.1 (ค)แสดงมุมตกกระทบของลำแสงโดยใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 1 การทดลองครั้งที่ 3.....	45
4.1 (ง)แสดงมุมตกกระทบของลำแสงโดยใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 1 ค่าเฉลี่ย.....	46
4.2 (ก)แสดงมุมตกกระทบของลำแสงโดยใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 2 การทดลองครั้งที่ 1.....	41
4.2 (ข)แสดงมุมตกกระทบของลำแสงโดยใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 2 การทดลองครั้งที่ 2.....	43
4.2 (ค)แสดงมุมตกกระทบของลำแสงโดยใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 2 การทดลองครั้งที่ 3.....	45
4.2 (ง)แสดงมุมตกกระทบของลำแสงโดยใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 2 ค่าเฉลี่ย.....	46
4.3 แสดงเวลาในการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูกันเชิงแสงที่มุมเฉลี่ย 37.23 องศา จากเรโซเนเตอร์ชนิดที่ 1.....	56
4.4 แสดงเวลาในการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูกันเชิงแสงที่มุมเฉลี่ย 37.44 องศา จากเรโซเนเตอร์ชนิดที่ 2.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

เฟสคอนจูเกชันเชิงแสง (Optical phase conjugation :OPC) เป็นเทคนิคที่มีการพัฒนามาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 ซึ่งเทคนิคนี้เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานหลายๆด้าน โดยการศึกษาเกี่ยวกับเฟสคอนจูเกชันเชิงแสงนั้นถือว่าเป็นงานวิจัยหนึ่งที่ได้รับคามสนใจเป็นอย่างมากทางด้านทัศนศาสตร์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear optics) และทางด้านควอนตัมอิเล็กทรอนิกส์

เมื่อเริ่มมีนักวิจัยสนใจ การทดลองเพื่อเปรียบเทียบความเข้มของลำแสงกับสนามไฟฟ้าภายในอะตอม และการกระจายตัวของอิเล็กตรอนภายในตัวกลาง ซึ่งถูกกระตุ้นจากการแผ่รังสีของลำแสง และจากการหักเห และการเลี้ยวเบนของแสงที่ตำแหน่งผิวหน้าและเดินทางผ่านเข้าไปในตัวกลาง ส่งผลให้ดัชนีหักเหแสงในตัวกลางแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความเข้มของลำแสงตกกระทบ ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear optics) [1] และเกิดขึ้นในตัวกลางแบบอเล็กโทรออปติกส์ (Electro optic) โดยในตัวกลางแบบนี้สามารถเกิดปรากฏการณ์หนึ่งที่น่าสนใจ คือปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ (Photorefractive effect : PR) [1] ซึ่งปรากฏการณ์นี้ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์อื่น ๆ อีก เช่น ปรากฏการณ์การผสมคลื่น 2 ขบวน (Two-wave mixing) ปรากฏการณ์การผสมคลื่น 4 ขบวน (Four-wave mixing) ปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเองแบบแอนไอโซโทรปิก (Anisotropic self-diffraction : ASD) [2] และปรากฏการณ์คลื่นเฟสคอนจูเกต (Phase conjugate wave) ซึ่งได้รับความสนใจในการศึกษาและทดลองของนักวิจัยเป็นอย่างมาก โดยลักษณะหนึ่งที่สำคัญของปรากฏการณ์การคลื่นเฟสคอนจูเกต คือการย้อนกลับได้ของลำแสงในผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟ เรียกตัวกลางหรือผลึกประเภทนี้ว่าตัวกลางโฟโตรีแฟรกทีฟ (Photorefractive medium) หรืออาจเรียกว่าตัวกลางทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear optic medium) ซึ่งในระดับพื้นฐานทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นจะศึกษาเกี่ยวกับอันตรกิริยาของลำแสงภายในวัสดุ การที่เรียกทัศนศาสตร์ไม่เชิงเส้นเพราะว่า วัสดุมีความสามารถในการตอบสนองต่อแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าอย่างไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งการเดินทางของลำแสงในวัสดุตัวกลางอธิบายโดยใช้ค่าดัชนีหักเหแสง ถ้าสามารถควบคุมการเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลางได้จากการส่องสว่างของลำแสง ดังนั้นจะสามารถควบคุมการเดินทางของลำแสงได้โดยใช้ลำแสงอีกลำหนึ่ง นำไปสู่การสร้างนวัตกรรมเทคโนโลยีใหม่ ๆ อีกมากมายบนพื้นฐานของการควบคุมแสงโดยใช้แสงลำเดียวจากลำแสงตกกระทบ

การทดลองในปี ค.ศ. 1972 พบว่าหน้าคลื่นของรังสีที่ถูกกระเจิงกลับจากการถูกกระตุ้นด้วยการกระเจิงของบริลลูอิน (Stimulated Brillouin scattering : SBS) เป็นแบบจำลองเวลาผันกลับของลำแสงที่กระตุ้นจากลำแสงตกกระทบ โดยยิงรังสีจากเลเซอร์พัลส์เดียวเข้าไปในเซลล์ SBS เมื่อตรวจสอบรังสีและหน้าคลื่นที่กระเจิงกลับ พบว่ารังสีนั้นมีลักษณะเหมือนกับรังสีตกกระทบ จากการทดลองพบว่าคลื่น

เฟสคอนจูเกตใน SBS มีอัตราความเข้มแสงเป็นสองเท่าของคลื่นที่มีเฟสไม่ตรงกัน ดังนั้นสัมประสิทธิ์ความเข้มแสงแบบเอ็กโพเนนเชียลเป็นความแตกต่างอย่างมากกับความเข้มแสงของคลื่นแสงเหล่านั้น และไม่กี่ปีต่อมาผลการทดลองข้างต้นถูกนำเสนอและแสดงให้เห็นว่าปรากฏการณ์การผสมคลื่นแสง 4 ขบวน (Optical four-wave mixing :FWM) [1] สามารถสร้างคลื่นเฟสคอนจูเกตได้ โดย FWM ในทัศนศาสตร์ตัวกลางแบบไม่เชิงเส้นถูกกระตุ้นด้วยคู่ของคลื่นที่เคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้าม เมื่อลำแสงที่ 3 เป็นลำแสงตกกระทบในตัวกลาง และคลื่นที่ 4 ถูกสร้างขึ้นมีเฟสตรงกับคลื่นของลำแสงตกกระทบ ซึ่งกระบวนการนี้สามารถตีความได้ว่าเป็นโฮโลกราฟีที่เกิดขึ้นพร้อมกัน ในตัวกลางจะมีลำแสงตกกระทบและลำแสงอีกลำหนึ่งที่ถูกระตุ้น ลักษณะความเข้มแสงที่แทรกสอดกันขึ้นอยู่กับค่าแอมพลิจูดสนามไฟฟ้าของคลื่นทั้งสอง ในตัวกลางแบบไม่เชิงเส้นบางชนิด

ในปี ค.ศ.1984 N.V. Kukhtarev และคณะได้ศึกษาและทดลองเกี่ยวกับการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสง (Optical Phase conjugation) [4] ในผลึก $BaTiO_3$ โดยไม่ต้องจ่ายสนามไฟฟ้าจากภายนอกให้กับผลึกในการสร้างสนามที่ว่างประจุ (Space-charge field) ซึ่งในการทดลองใช้เลเซอร์อาร์กอน-ไอออนความยาวคลื่น 496.5 นาโนเมตร สามารถสังเกตเห็นปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงและในปี ค.ศ. 1985 Doyle A. Temple และ Cardinal Warde ได้ศึกษาการกระเจิงของแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนผลึกโพโตรีแฟรกทีฟ เช่น $BaTiO_3$ และ $LiNbO_3$ [5]

ในปี ค.ศ. 1995 Changxi Yang และเพื่อนร่วมงานจึงได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติโพโตรีแฟรกทีฟของผลึกแบเรียมไททานเต กับ ผลึกแบเรียมไททานเตที่เจือด้วยอะตอมซีเรียม ($Ce:BaTiO_3$) [5] ซึ่งในการศึกษาพบว่าผลึกแบเรียมไททานเตที่เจือด้วยอะตอมซีเรียม สามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption coefficient) สัมประสิทธิ์การขยายอิเล็กโทรออปติกส์ (Electro-optic gain coefficient) และความหนาแน่นของกับดักยั้งผลทั้งหมด (Total effective trap density) อย่างเป็นระบบตามความเข้มข้นของอะตอมซีเรียม (Ce) ที่เพิ่มขึ้น ที่ความยาวคลื่นแสง 514.5 นาโนเมตร และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับสัมประสิทธิ์การขยายอิเล็กโทรออปติกส์ ขึ้นอยู่กับความเข้มแสงที่ตกกระทบ และยังพบว่าเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อแสง (Response time) ของผลึกที่เจือด้วยอะตอมซีเรียมน้อยกว่าผลึกที่ไม่ได้เจือด้วยอะตอมซีเรียม โดยผลึกแบเรียมไททานเตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียมด้วยความเข้มข้น 15 ppm ที่ความเข้มแสง 800 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร ใช้เวลาในการตอบสนองต่อแสงแค่ 220 มิลลิวินาที และสามารถขยายช่วงความยาวคลื่นการตอบสนองต่อแสงของผลึกกว้างขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มคุณสมบัติโพโตรีแฟรกทีฟของผลึกแบเรียมไททานเต [3]

ในการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงนั้น ตัวกลางที่ใช้จำเป็นต้องเป็นตัวกลางที่มีคุณสมบัติโพโตรีแฟรกทีฟ ซึ่งเป็นผลึกแบบทัศนศาสตร์อย่างไม่เป็นเชิงเส้นและเป็นผลึกที่มีความเป็นอิเล็กโทรออปติกส์ ซึ่งจากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา ในการใช้เลเซอร์ยิงผ่านเข้าไปในผลึกชนิดไม่เจือด้วยอะตอมของสารเจือ แต่เป็นที่รู้กันอยู่แล้วว่ามันถูกเจือด้วยเหล็ก ก็จะทำให้เกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงได้แต่จะต้องใช้เทคนิคหลายๆอย่างเข้ามาช่วย จึงจะทำให้เกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงขึ้นได้และมีการใช้แสงสีเขียวจากเลเซอร์อาร์กอน-ไอออน ยิ่งผ่านผลึกแบเรียมไททานเตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงได้อย่างง่ายแต่สำหรับงานวิจัยนี้จะเป็นการสร้างปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงโดยใช้เลเซอร์แสงสีแดงยิง เพื่อให้เกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงโดยใช้ผลึกแบเรียมไททานเตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรคทีฟที่เกิดขึ้นกับผลึกแบเรียมไททานเตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกตในผลึกแบเรียมไททานเตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียมด้วยเรโซเนเตอร์แบบต่างๆ
- 1.2.3 เพื่อศึกษามุมตกกระทบที่เหมาะสมที่สุดระหว่างลำแสงเลเซอร์กับผิวหน้าผลึกในการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกตด้วยความเข้มแสงมากที่สุดหรือสามารถสังเกตลำแสงสะท้อนได้ชัดเจนที่สุด
- 1.2.4 เปรียบเทียบการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกตจากแหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันคือ แสงสีแดงและแสงสีเขียวที่นักวิจัยท่านอื่นๆเคยทำมาแล้ว

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาค้นคว้าและทบทวนบทความวิจัย ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรคทีฟ และปรากฏการณ์การเฟสคอนจูเกต รวมถึงการประยุกต์ใช้งาน
- 1.3.2 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรคทีฟ การเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกตและการเดินทางของแสงในตัวกลางแบบไม่เชิงเส้น
- 1.3.3 วัตถุประสงค์ที่เหมาะสมของลำแสงเลเซอร์ บนผลึกแบเรียมไททานเตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม โดยวางผลึกบนแท่นที่ติดตั้งอยู่บนรางเลื่อน เพื่อปรับระยะห่างของผลึกเข้าและออกจากแหล่งกำเนิดแสง จนเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกตที่มีความเข้มแสงมากที่สุดหรือสามารถสังเกตลำแสงสะท้อนได้ชัดเจนที่สุด
- 1.3.4 เปรียบเทียบการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกตจากแหล่งกำเนิดเลเซอร์แสงสีแดงและแสงสีเขียว ที่นักวิจัยท่านอื่นๆเคยทำมาแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 จัดเตรียมวัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
- 1.4.3 ติดตั้งอุปกรณ์และจัดระบบการทดลอง
- 1.4.4 ทำการทดลองเพื่อศึกษาการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงตกกระทบในผลึก
แบบเรียบโททานิตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม
- 1.4.5 บันทึกผลการทดลองที่ได้ระหว่างมุมตกกระทบที่กระทำกับผลึก พร้อมกับวิเคราะห์ค่า PC
Reflectivity และเวลาในการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงของเรโซเนเตอร์ทั้ง
สองชนิด
- 1.4.6 นำเสนอผลการทดลอง
- 1.4.7 เขียนเล่มรายงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 1.4.1 สามารถอธิบายการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรคทีฟ และปรากฏการณ์การเฟสคอนจู-
เกตที่เกิดขึ้นในวัสดุทางทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นได้
- 1.4.2 สามารถอธิบายอันตรกิริยาของลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบตัวกลางแบบอเล็กโทรอป-
ติกส์ และการเดินทางของแสงออกจากตัวกลางได้
- 1.4.3 สามารถอธิบายหลักการใช้อุปกรณ์ทางแสงในการควบคุมลำแสงเลเซอร์ตามทิศทางที่
ต้องการใช้งาน ตลอดจนข้อควรระวัง การทำความสะอาด และการเก็บรักษาอุปกรณ์
ให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน
- 1.4.4 สามารถออกแบบการทดลอง เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่มีประสิทธิภาพ
- 1.4.5 สามารถนำผลการทดลองที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับงานอื่นๆได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น

ค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลางโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับ การจัดเรียงตัวของอะตอมและการกระจายตัวของอิเล็กตรอนในตัวกลางนั้น เมื่อส่องสว่างลำแสงลงบนตัวกลาง ทำให้ประจุซึ่งส่วนมากเป็นอิเล็กตรอนถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ขึ้นและลงตามทิศทางของสนามไฟฟ้าของแสงตกกระทบ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทำให้เกิดการแผ่รังสีและสร้างสนามไฟฟ้าภายในตัวกลาง ซึ่งเป็นสัดส่วนกับสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบ เป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟส (Phase) ในการส่งผ่านสนามไฟฟ้า ซึ่งการเปลี่ยนเฟสของสนามไฟฟ้าจะเกิดช้ากว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของแสง ถ้าความเข้มของลำแสงตกกระทบมีค่าน้อย ดังนั้นสนามไฟฟ้าของลำแสงต้องมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับสนามไฟฟ้าภายในอะตอมของตัวกลาง แสดงให้เห็นว่าความเข้มแสงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนเฟสของสนามไฟฟ้า และไม่มีผลต่อการเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลาง ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางทศนศาสตร์แบบเชิงเส้น (Linear optics) [1]

เมื่อเปรียบเทียบความเข้มของลำแสงกับสนามไฟฟ้าภายในอะตอม และการกระจายตัวของอิเล็กตรอนภายในตัวกลาง สามารถถูกกระตุ้นจากการแผ่รังสีของลำแสง เมื่อแสงเดินทางผ่านเข้าไปในตัวกลางแสงจะเกิดการหักเหและการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่งผิวหน้าของตัวกลาง ส่งผลให้ค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลางเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับความเข้มของลำแสงตกกระทบ (Intensity) ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางทศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear optics) ในระดับพื้นฐานทศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นจะศึกษาเกี่ยวกับอันตรกิริยาของลำแสงภายในวัสดุ การที่เรียกทศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นเพราะว่า วัสดุมีความสามารถในการตอบสนองต่อแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าอย่างไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งการเคลื่อนที่ของลำแสงในวัสดุตัวกลางอธิบายโดยใช้ค่าดัชนีหักเหแสงที่เปลี่ยนไป ถ้าสามารถควบคุมค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลางได้จากการส่องสว่างของลำแสง ดังนั้นจะสามารถควบคุมการเดินทางของลำแสงได้ นำไปสู่การสร้างนวัตกรรมเทคโนโลยีใหม่ ๆ จำนวนมากบนพื้นฐานของการควบคุมแสงโดยใช้แสงตกกระทบเพียงลำเดียว

ในทฤษฎีสถานแม่เหล็กไฟฟ้าของแสง วัสดุจะตอบสนองต่อการส่องสว่างของแสง ซึ่งอธิบายโดยใช้สมการการโพลาไรซ์ของแสง

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

เมื่อ \mathbf{P} คือโพลาไรเซชันที่ถูกเหนี่ยวนำในตัวกลางในหน่วยคูลอมบ์ต่อตารางเมตร (C/m^2) [16]

ϵ_0 คือ สภาพความยอมทางไฟฟ้าในสุญญากาศในหน่วยคูลอมบ์ต่อนิวตัน-เมตร (C/N-m)

\mathbf{E} คือสนามไฟฟ้าของแสงในหน่วยนิวตันต่อคูลอมบ์ (N/C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$x^{(1)}, x^{(2)}, x^{(3)}$ คือค่าความไวต่อสนามไฟฟ้าของตัวกลางในหน่วยคูอมบ์ต่อเมตร (C/m)

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

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

ส่วนในทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นการตอบสนองต่อแสงของตัวกลางจะมีลักษณะเฉพาะ โดยมีค่าพารามิเตอร์ $x^{(2)}$ และ $x^{(3)}$ ทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่น่าสนใจมากมาย และการประยุกต์ใช้จากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากเทอมที่ 2 ในสมการ (2.1) $\epsilon_0 x^{(2)} \mathbf{E}\mathbf{E}$ เป็นเทอมของการเกิดฮาร์โมนิกอันดับที่ 2 (ความถี่เป็นสองเท่า) มีค่าเป็นบวก และมีความถี่ที่แตกต่างกัน เพื่อขยายค่าพารามิเตอร์ และการสั้น ส่วนเทอมที่ 3 ในสมการ (2.1) $\epsilon_0 x^{(3)} \mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{E}$ เป็นเทอมการเกิดฮาร์โมนิกอันดับที่ 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

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

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} คูอมบ์ต่อเมตร สำหรับลำแสงเลเซอร์ที่มีกำลังปานกลางจะมีสนามไฟฟ้าเทียบกับสนามไฟฟ้าภายในอะตอมของตัวกลาง เท่ากับ 10×10^6 โวลต์ต่อเซนติเมตร ซึ่งการส่องสว่างลำแสงเลเซอร์ลงบนวัสดุที่เหมาะสมส่งผลให้ค่าดัชนีการหักเหแสงในตัวกลางนั้น ๆ เปลี่ยนแปลง อาจจะมีผลต่อการเดินทางของแสงภายในวัสดุตัวกลางนั้นด้วย

ก่อนปี ค.ศ. 1961 นักวิทยาศาสตร์ยังไม่มีความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติทางทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น จึงมีการวิจัยทางวิทยาศาสตร์เพื่อแสดงให้เห็นว่าความเข้มของแสง และลำแสงอื่น ๆ ไม่ส่งผลกระทบต่อ การเลี้ยวเบน และการหักเหของแสงในวัสดุโปร่งแสง เป็นคุณสมบัติทางทัศนศาสตร์เชิงเส้น และหลักการพื้นฐานของการซ้อนทับของคลื่นแสง และลักษณะเฉพาะของวัสดุโปร่งแสงคือ ความเข้มแสงไม่ส่งผลต่อค่าดัชนีการหักเหแสงในตัวกลาง ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงสรุปคุณสมบัติทางทัศนศาสตร์แบบเชิงเส้นว่า ความเข้มแสงที่ออกจากตัวกลางที่มีความเข้มสม่ำเสมอจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสงที่ผ่านเข้าไปใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวกลางและความถี่ของแสงที่ผ่านออกจากตัวกลาง หมายความว่าความเข้มแสงที่ผ่านเข้าไปและยังคงอยู่ในตัวกลาง ส่วนปรากฏการณ์ทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นยังไม่มีข้อพิสูจน์มาก่อนหน้านี้ ทำให้มีการนำเครื่องมือในการจัดการและควบคุมความถี่และความเข้มของลำแสงเลเซอร์มาใช้ เพื่อศึกษาและคิดค้นทฤษฎีใหม่ ๆ ของการประยุกต์ใช้ทางทัศนศาสตร์อย่างกว้างขวาง

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

ตั้งแต่มีการทดลองศึกษาการเกิดฮาร์มอนิกของแสง ส่งผลให้การศึกษาเพื่อหาสนามไฟฟ้าทางทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นก็ได้เป็นที่รู้จักกันอย่างรวดเร็ว และได้ค้นพบปรากฏการณ์ทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นที่ต่างต่างกัน เช่น การผสมพารามิเตอร์ของแสง (Optical parametric mixing) การกระเจิงของบริลลูอิน (Stimulated Brillouin scattering) ปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกต (Phase conjugate) การผสมคลื่น (Wave mixing) และ อื่น ๆ ซึ่งปรากฏการณ์ทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น ต้องใช้ลำแสงเลเซอร์ที่มีความเข้มสูง โดยเฉพาะในกระบวนการศึกษาการเกิดฮาร์มอนิกอันดับที่สูงขึ้นต้องใช้ความเข้มแสงที่สูงมาก (ฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 ขึ้นไป)

2.2 ปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ

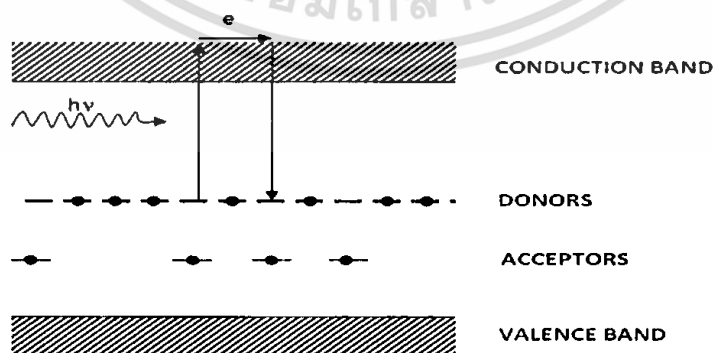
ปรากฏการณ์โฟตรีแฟรกทีฟในตัวกลางแบบอเล็กโทรออปติกส์เป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้ดัชนีหักเหแสงในตัวกลางเปลี่ยนเนื่องจากความเข้มแสงที่ผ่านเข้ามาในพื้นที่ว่างของตัวกลาง ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เมื่อ ในปี ค.ศ. 1966 Ashkin et. al. ได้ค้นพบเป็นครั้งแรก ในผลึกลิเทียมไนโอเบต (LiNbO_3) โดยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการส่องผ่านของลำแสงเลเซอร์ ซึ่งเป็นแสงที่มีคุณสมบัติความเป็นโคฮีเรนซ์ (Coherent light) ผ่านผลึกแบบอเล็กโทรออปติกส์ ในการศึกษาครั้งนี้พบว่า ลำแสงเลเซอร์ที่ผ่านผลึกอเล็กโทรออปติกส์ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลาง และสามารถเกิดปรากฏการณ์โฟตรีแฟรกทีฟขึ้น ต่อมาได้มีการทดลองและสังเกตปรากฏการณ์โฟตรีแฟรกทีฟในตัวกลางจำนวนมาก ยกตัวอย่างเช่น ลิเทียมไนโอเบต (LiNbO_3) แบเรียมไททานเตต (BaTiO_3) แกลเลียมอาเซไนด์ (GaAs) แคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) อินเดียมฟอสไฟด์ (InP) วัสดุพ็อคภัยควอนตัมแบบหลายบ่อ (Multi quantum well materials) และวัสดุออร์แกนิก (Organic material) หรือ พอลิเมอร์บางชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 แบบจำลองการเคลื่อนย้ายประจุระหว่างแถบพลังงาน

การพิจารณาจากแบบจำลองการเคลื่อนย้ายประจุระหว่างแถบพลังงาน (Band transport model) หรือ สมการของคุกทาทาเรฟ (Kukhtarev's equation) ซึ่งเป็นผู้สร้างแบบจำลองขึ้นมาเพื่อใช้อธิบายการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ โดยในแบบจำลองพื้นฐานตัวกลางโฟโตรีแฟรกทีฟ ประกอบด้วยสารเจือบางชนิด หรืออาจมีความไม่สมบูรณ์ในตัวกลางนั้น ดังนั้นในการอธิบายหลักการอย่างง่ายของการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟถือว่าสารเจือผู้ให้ (Donor impurity) ทั้งหมดเหมือนกันและอยู่ที่ระดับพลังงานเดียวกันในแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งสารเจือผู้ให้เหล่านั้นสามารถแตกตัวเป็นไอออนได้เนื่องจากการดูดกลืนโฟตอนจากแสงที่ตกกระทบตัวกลาง และการแตกตัวเป็นไอออนทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่เข้าไปบริเวณแถบนำกระแสได้ (Conduction band) ปล่อยให้ว่างไว้ที่ตำแหน่งเดิมและสารเจือผู้ให้กลายเป็นไอออนมีความสามารถในการจับกับอิเล็กตรอนอิสระได้อีกครั้งกำหนดให้

- N_D คือความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้ในหน่วยอะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (atom/cm^3)
- N_D^+ คือความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้ที่เป็นไอออนในหน่วยอะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (atom/cm^3)
- N คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ ในหน่วยอะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (atom/cm^3)
- s คือภาพตัดขวางในตัวกลางจากการกระตุ้นด้วยแสง ในหน่วยตารางเซนติเมตร (cm^2)
- I คือความเข้มแสง ในหน่วยมิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (mW/cm^2)
- β คือ อัตราการเกิดความร้อนของอิเล็กตรอน
- γ_R คืออัตราการรวมตัวกันใหม่ระหว่างกับดักที่เป็นไอออนกับอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.1 แสดงการดูดกลืนโฟตอนของอิเล็กตรอนเข้าสู่แถบนำกระแส ด้วยแบบจำลองการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

สำหรับไอออนของสารเจือทั้งหมดที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา หรืออิเล็กตรอนจะถูกจับใหม่อีกครั้งเมื่อเติมสารเจือใหม่ลงในที่ว่างของตัวกลาง ดังนั้นอัตราการเกิดอิเล็กตรอนเท่ากับอัตราการเกิดไอออนของสารเจือ นอกจากนี้ว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในขณะที่สารเจืออยู่กับที่ไม่เกิดการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญสำหรับการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ 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 (1.602×10^{-19} คูลอมบ์)

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 μ คือ เทนเซอร์ความคล่องตัวอิเล็กตรอน ในหน่วยตารางเมตรต่อโวลต์-วินาที ($m^2/V\cdot s$)

E คือ สนามไฟฟ้า ในหน่วยนิวตันต่อคูลอมบ์ (N/C)

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

และอธิบายสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยใช้สมการของปัวส์ซง (Poisson's equation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ ϵ คือสภาพความยอมทางไฟฟ้าของตัวกลางในหน่วยคูลอมบ์ต่อนิวตัน-เมตร (C/N-m)

$\rho(r)$ คือค่าความหนาแน่นประจุ ในหน่วยคูลอมบ์ต่อลูกบาศก์เมตร (C/m³)

N_A คือความหนาแน่นของสารเจือผู้รับในหน่วยอะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (atom/cm³)

ซึ่งสารเจือผู้รับ (Acceptor impurity) มีความสำคัญต่อความเป็นกลางทางไฟฟ้าของประจุ ในกรณีที่ไม่มีการส่องสว่างแสง ความเป็นกลางของประจุสามารถเขียนได้ดังสมการ

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

ในกรณีที่ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยมาก ทำให้ $N_D^i = N_A$ ในสภาวะที่ไม่มีแสง หรือ ความเข้มของสารเจือผู้ให้ เท่ากับ ความหนาแน่นของสารเจือผู้รับ จากสมการ (2.6) เทอมแรก ($qN\mu\mathbf{E}$) แสดงถึงความหนาแน่นกระแสจากการไหลของประจุพาหะเนื่องจากสนามไฟฟ้า และเทอมที่สอง ($k_B T\mu\nabla N$) แสดงถึงความหนาแน่นกระแสจากการแพร่กระจายเนื่องจากเกรเดียนต์ ของประจุ แต่ในกรณีนี้เราไม่พิจารณากระแสเนื่องจากปรากฏการณ์โฟโตโวลเทอิก (Photovoltaic effect) เนื่องจากมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกระแสที่เกิดจากประจุพาหะ

รูปที่ 2.1 ประกอบด้วยสารเจือผู้ให้และสารเจือผู้รับ โดยปกติความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้จะมากกว่าความหนาแน่นของสารเจือผู้รับ และสมมุติว่าสารเจือทั้งหมดเหมือนกัน ในกรณีที่ไม่มีอิเล็กตรอนในแถบนำกระแส และไม่มีโฮลในแถบวาเลนซ์ ความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้ที่เป็นไอออนจะเท่ากับสารเจือผู้รับ ซึ่งสารเจือผู้ให้ที่เป็นกลางสามารถให้อิเล็กตรอนจากการกระตุ้นด้วยแสง (Photonexcitation) และไอออนของสารเจือผู้ให้จำนวนหนึ่งสามารถจับกับโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) ในแบบจำลองนี้สารเจือผู้รับมีหน้าที่เพียงทำให้ประจุเป็นกลางทางไฟฟ้า ไม่ได้มีผลโดยตรงต่อกระบวนการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ

ในส่วนี้เราจะพิจารณาการที่แสงเลเซอร์ 2 ลำเดินทางเข้าสู่ตัวกลางโฟโตรีแฟรกทีฟ เขียนสมการสนามไฟฟ้าได้ดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติให้ความถี่ของแสงเลเซอร์ 2 ลำเท่ากัน เมื่อ \mathbf{E}_a , \mathbf{E}_b คือแอมพลิจูดสนามไฟฟ้าของคลื่น \mathbf{k}_a , \mathbf{k}_b คือเวกเตอร์คลื่น ถ้าสถานะการโพลาไรซ์ของคลื่นแสงทั้ง 2 ลำไม่ตั้งฉากกัน ดังนั้นสามารถเขียนรูปแบบลักษณะการแทรกสอดของคลื่นด้วยความเข้มแสง

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

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

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

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

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

ขนาดของเวกเตอร์คลื่นเกรตติงสัมพันธ์กับคาบ (Λ) ของรูปแบบการแทรกสอดของลำแสง

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

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

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

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

พิจารณาขณะที่ส่องสว่างลำแสงเลเซอร์เข้าสู่ตัวกลางโพโตรีแฟรกทีฟ 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 ผลจากการส่องสว่างแสงที่มีความเป็นโคฮีเรนท์ลงบนตัวกลางโพโตรีแฟรกทีฟ บริเวณที่ไม่มีแสงสว่างประจุจะเป็นลบ ส่วนบริเวณที่มีความสว่างประจุจะเป็นบวก โดยการแยกที่ว่างประจุ (Space-charge) เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งการกระจายของกระแส (Diffusion current) สมดุลกับการไหลของกระแส (Drift current) ซึ่งองค์ประกอบพื้นฐานของความหนาแน่นที่ว่างประจุ (Space-charge density) สามารถเขียนได้ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

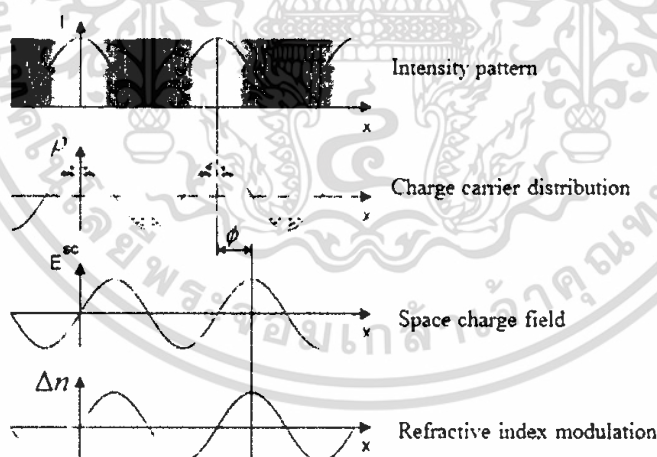
เมื่อ ρ_0 คือค่าคงตัว และทำการอินทิเกรตสมการของปัวซองจากสมการที่ (2.7) จะได้

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

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

สามารถสรุปกระบวนการพื้นฐานในการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกในผลึกแบบอเล็กโทรออปติกส์ (Electro-optic) ประกอบด้วย 5 กระบวนการ คือ

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



รูปที่ 2.2 แสดงกระบวนการสร้างดัชนีเกรตติงด้วยการแทรกสอดของคู่ลำแสงตกกระทบบนตัวกลางที่มีความเข้มแสงแบบเป็นคาบลงบนตัวกลางแบบอเล็กโทรออปติกส์

ปรากฏการณ์โฟตรีแฟรกทีฟเป็นปรากฏการณ์ที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าและต้องเกิดประจุพาหะ และการกระจายของประจุพาหะจำนวนมาก โดยปกติความหนาแน่นของประจุพาหะอยู่ในระดับ 10^{15} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^{-3})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ความเข้มการส่องสว่างในสมการที่ (2.10) เพื่อหาค่าสนามที่ว่างประจุในฟังก์ชัน r และ t โดยใช้สมการ (2.4) และ (2.7) ซึ่งสมการคำตอบแบบปิดโดยทั่วไปไม่สามารถใช้ได้สำหรับกรณีนี้ ดังนั้นจึงอธิบายประจุพาหะที่สถานะคงตัว โดยกำหนดให้เวลา (t) ในการดิฟเฟอเรนเชียล เท่ากับ 0 จะได้สมการที่สถานะคงตัวตามสมการ (2.4) และ (2.7) คือ

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

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

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

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

ใช้สมการเหล่านี้เพื่อหาผลเฉลยของสมการสนามไฟฟ้า (E) ในเทอมของความเข้มแสง $I(r)$ ดังนั้นสมการคำตอบแบบปิดสามารถใช้ในกรณีที่ความเข้มแสงในการกระตุ้นประจุพาหะมีค่าน้อยมาก กล่าวคือ $|I_1| \ll I_0$ จากข้อสมมุติฐานดังกล่าวสามารถละเทอมฮาร์มอนิกอันดับที่สูงกว่าได้ และสามารถเขียนสมการที่สถานะคงตัวได้ดังนี้

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

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

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

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

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 ลำด้วยแกนโพลาริซตั้งฉากกัน 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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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]

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

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

$$K \cdot (qN_1 \mu E_0 + qN_0 \mu E_1 - ik_B T \mu K N_1) = 0 \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

จากสมการแมกซ์เวลล์ ข้อที่ 4 (Curl Maxwell equation) ในกรณีที่อยู่ในสถานะคงตัว $\nabla \times \mathbf{E} = 0$ ทำให้ $K \times \mathbf{E}_1 = 0$ หมายความว่า E_1 เท่ากับ K หลังจากหาคำนวณ และประมาณค่าของเทอมพีชคณิตต่าง ๆ ทำให้เราสามารถหาค่าสนามที่ว่างประจุได้ดังสมการ

$$\mathbf{E}_1 = \frac{iK \frac{k_B T}{q} - \frac{K \cdot \mu E_0}{K(\mu)}}{1 + \frac{K^2}{k_D^2} + i \frac{qK \cdot \mu E_0}{k_B T k_D^2 (\mu)}} I_1 \quad (2.33)$$

เมื่อ

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

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

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

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

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

เมื่อถึงสมการ (2.33) เราสามารถสันนิษฐานว่า $\gamma_R N_A \gg s I_0$ และ $N_D s I_0 \gg \gamma_R N_A^2$ นอกจากนี้สามารถประมาณได้ว่าความเข้มแสงที่ผ่านตัวกลางมีค่าน้อยกว่าความเข้มแสงตกกระทบบาก ๆ คือ $I_1 \ll I_0$

ในกรณีนี้เมื่อสนามไฟฟ้ากระแสตรง (E_0) มีค่าเท่ากับเวกเตอร์เกรตติง (K) สามารถลดรูปสมการที่ (2.33) ได้เป็น

$$\mathbf{E}_1 = \frac{iK \frac{k_B T}{q} - \frac{K \cdot E_0}{K}}{1 + \frac{K^2}{k_D^2} + i \frac{qK \cdot E_0}{k_B T k_D^2}} I_1 \quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

$$k_D^2 = \frac{q^2 N_A}{\langle \epsilon \rangle k_B T} = \frac{q^2 N_D^0}{\langle \epsilon \rangle k_B T} \quad (2.39)$$

เมื่อ N_D^0 คือค่าความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้ที่แตกตัวเป็นไอออน ซึ่งประจุที่เป็นบวกสามารถจับกับอิเล็กตรอนได้

2.2.2 การเดินทางของคลื่นแสงในตัวกลางแบบเป็นคาบ

หลาย ๆ ความสำคัญและปรากฏการณ์ที่มีประโยชน์ ซึ่งเกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ เนื่องจากการกระเจิงของแสงจากเกรตติง หรือภาพฮอโลแกรมที่เกิดขึ้นในผลึก ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวได้แก่ การผสมกันของคลื่น (Wave mixing) การเกิดเฟสคอนจูเกต (Phase conjugate) ไดนามิกฮอโลกราฟี (Dynamic holography) และอื่น ๆ โดยเกรตติงหรือภาพฮอโลแกรมในตัวกลางเหล่านี้แสดงได้จากการเปลี่ยนแปลงแบบเป็นคาบของดัชนีการหักเหแสง ซึ่งคุณสมบัติทั่วไปของการเดินทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางแบบเป็นคาบ ๆ โดยเริ่มพิจารณาจากหลักการพื้นฐานการกระเจิงของแบรกก์ (Bragg scattering) และการอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัม

โดยทั่ว ๆ ไปในตัวกลางแบบเป็นคาบจะมีโครงสร้างใด ๆ ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กทริก การสะท้อนแบบสมมาตรเป็นฟังก์ชันแบบคาบของตำแหน่ง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 Λ คือคาบ ตามความหมายโดยทั่วไปตัวกลางแบบเป็นคาบหมายถึง เฟสเกรตติง (Phase grating) ซึ่งประกอบด้วยแผ่นกระจกบาง ๆ ที่มีแถวของช่องว่างระยะห่างเท่า ๆ กันขนานกัน เกรตติงสะท้อน (Reflecting grating) ประกอบด้วยผิวโลหะแบนที่มีแถวของช่องว่างระยะห่างเท่า ๆ กันขนานกัน โฮโลแกรมแบบปริมาตร (Volume hologram) ประกอบด้วยตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยดัชนีการหักเหแสงถูกเปลี่ยนเป็นคาบ ซึ่งแถวระนาบสามมิติเป็นคาบของอะตอม เช่น ตัวกลางที่เป็นผลึก

วัสดุโฟโตรีแฟรกทีฟสามารถเป็นตัวกลางแบบเป็นคาบได้ด้วยการเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลางแบบเป็นช่วง ๆ ซึ่งทำได้โดยการส่องสว่างแสงด้วยความเข้มแสงที่มีความเป็นโคฮีเรนต์ลงบนพื้นที่ตัวกลาง 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

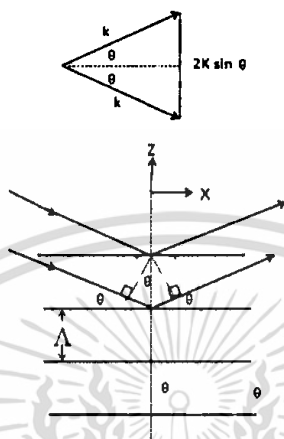
$$\int_0^\Lambda p(z) dz = 0 \quad (2.46)$$

ในสมการที่ (2.43) ค่า n_0 คือดัชนีการหักเหแสงของวัสดุเมื่อไม่มีการกระตุ้นด้วยแสง และ n_1 คือ ค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลางเมื่อมีการส่องสว่างแสงเข้าไปในตัวกลาง หรืออาจเรียก n_1 ว่าดัชนีมอดูเลตเชิงลึก โดยที่วัสดุโฟโตรีแฟรกทีฟเกือบทุกชนิดค่า n_1 อยู่ในระดับ 10^{-3} ถึง 10^{-5}

พิจารณาการกระเจิงของคลื่นระนาบแบบแสงเอกรงค์ (Monochromatic plane wave) จากตัวกลางแบบเป็นคาบ ดังแสดงในรูป 2.3 ซึ่งการศึกษากการกระเจิงดังกล่าวมีผลมาจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) ในของแข็ง โดยพิจารณาเมื่อดัชนีมอดูเลตถูกรวมกันที่แถวของระนาบที่มีระยะเท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ๆ กัน นอกจากนี้เรารู้ว่าระนาบเหล่านี้มีไม่จำกัด หรือมีจำนวนอนันต์ ดังนั้นการหักเหจากระนาบเป็นการสะท้อนเหมือนกับการสะท้อนจากกระจกเงา ที่มีมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน โดยแต่ละระนาบสะท้อนเพียงส่วนน้อยมาก ๆ ของคลื่นระนาบตกกระทบ ซึ่งแสงที่ถูกกระเจิงประกอบด้วยคลื่นที่ขนานกับแนวของคลื่นระนาบที่ถูกหักเหเหล่านั้น ส่วนลำแสงเลี้ยวเบนเกิดขึ้นเมื่อคลื่นระนาบที่ถูกสะท้อนเหล่านั้นเกิดขึ้น



รูปที่ 2.3 แสดงการกระเจิงของคลื่นระนาบจากแสงเอกรงค์ลงบนตัวกลางแบบเป็นคาบ [1]

กำหนดให้ Λ คือ ระยะระหว่างระนาบของคลื่น ซึ่งเป็นคาบของการเปลี่ยนดัชนีหักเหแสง ความแตกต่างเส้นทางของรังสีที่สะท้อนจากระนาบ 2 ระนาบที่อยู่ติดกันมีค่าเท่ากับ $2\Lambda \sin \theta$ เมื่อ θ คือ มุมระหว่างรังสีกับระนาบ และการแทรกสอดของคลื่นเกิดขึ้นเมื่อความแตกต่างของเส้นทางรังสีเป็นจำนวนเต็มของความยาวคลื่น λ/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 (θ) 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

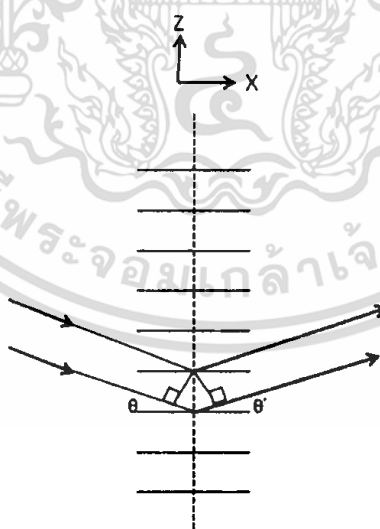
$$K = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2.49)$$

เทอมด้านซ้ายของสมการ (2.48) $2k \sin \theta$ 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 โดยทราบว่า องค์ประกอบฟูรีเยร์อันดับที่ m เป็นเลขคลื่น $m(2\pi/\Lambda)$ ซึ่งองค์ประกอบแต่ละตัวของฟูรีเยร์กระจายตามอันดับการเลี้ยวเบนของแบรกก์ ถึงแม้กฎการเลี้ยวเบนของแบรกก์ อธิบายตัวกลางที่มีเกรตติงไม่จำกัด ผลในสมการ (2.47) และ (2.48) ถูกต้องตามขนาดของระนาบการหักเหเหล่านั้น ซึ่งต้องมีค่ามากกว่าขนาดของลำแสง ภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้ตัวกลางแบบเป็นคาบถูกเรียกว่าเกรตติงหนา (Thick grating) หรือเกรตติงปริมาตร (Volume grating)



รูปที่ 2.4 แสดงการเลี้ยวเบนแสงในตัวกลางแบบเป็นคาบจากเกรตติงแบบบาง [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.4 เราพิจารณากรณีของเกรตติงบาง ๆ ซึ่งเกรตติงแบบนี้ขนาดตามขวางของการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหแสงแบบเป็นคาบขนาดค่อนข้างเล็กเมื่อเทียบกับขนาดของลำแสงหรือความยาวคลื่นของแสง เมื่อคลื่นระนาบตกกระทบบนในตัวกลางแบบเป็นคาบ การเลี้ยวเบนของคลื่นแต่ละระนาบเกิดขึ้นจากการสะท้อนแบบการสะท้อนจากกระจกเงา ซึ่งการเลี้ยวเบนแสงแต่ละระนาบเหล่านี้เป็นผลมาจากขนาดที่จำกัดของระนาบ เนื่องจากระนาบที่จำกัดนี้ช่วยให้แสงที่กระเจิงถูกบังคับตามมุม θ' ซึ่งมีค่าแตกต่างจากมุมตกกระทบบ θ การใช้เหตุผลที่คล้ายกันในสมการที่ (2.47) ดังนั้นได้เงื่อนไขสำหรับการแทรกสอดของคลื่น

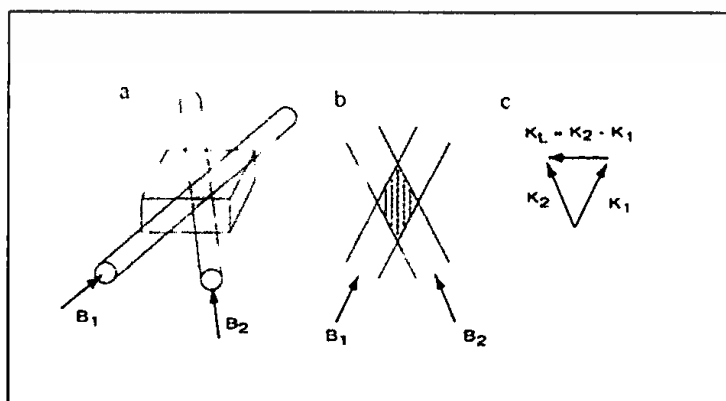
$$\Lambda \sin \theta + \Lambda \sin \theta' = N(\lambda/n) \quad (2.51)$$

เมื่อ N คือ จำนวนเต็ม จากสมการ (2.51) มีชุดของอันดับการเลี้ยวเบนแสงสำหรับมุมใด ๆ ของการตกกระทบบ ซึ่งเป็นความแตกต่างระหว่างเกรตติงแบบบาง (Thin grating) และ เกรตติงแบบหนา (Thick grating) โดยเกรตติงแบบหนามีเพียงการเลี้ยวเบนเพียงอันดับเดียว นอกจากนี้การเลี้ยวเบนเกิดขึ้นเพียงเมื่อมุมตกกระทบบเป็นไปตามกฎของแบรกก์เท่านั้น

2.2.3 ปรากฏการณ์การผสมคลื่นในตัวกลางโฟโตรีแฟรกทีฟ

2.2.3.1 ปรากฏการณ์ผสมคลื่น 2 ขบวน

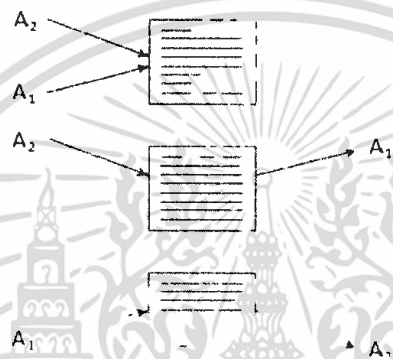
เมื่อลำแสง 2 ลำของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติโคฮีเรนต์ติดกันภายในตัวกลางโฟโตรีแฟรกทีฟ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงแบบเป็นคาบของความเข้มแสงเนื่องจากการแทรกสอดทำให้เกิดดัชนีเกรตติงแบบหนา (Volume index grating) ภายในตัวกลาง โดยเวกเตอร์คลื่นเกรตติง (Grating wave vector) ได้จาก $K = \pm(k_2 - k_1)$ เมื่อ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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.5 แสดงการผสมคลื่นสองขบวน (Two-Wave Mixing)

จากรูปที่ 2.8 (a) เมื่อลำแสงเลเซอร์ B_1 และ B_2 ตัดกัน จะเกิดการแทรกสอดกันในบริเวณที่มีการตัดกัน (b) เป็นรูปแบบของการแทรกสอดที่เกิดขึ้นโดยลำแสงทั้งสองตัดกันเป็นเกิดเป็นมุมระหว่างลำแสงทั้งสอง (c) แสดงเวกเตอร์คลื่นของลำแสงทั้งสองที่ตัดกัน รวมถึงเวกเตอร์ K_L ที่เกิดขึ้นด้วย



รูปที่ 2.6 แสดงการกระเจิงของแบรกก์เนื่องจากเกรตติงแบบหนาในตัวกลางโพโตรีแฟรกทีฟ [1]

จากรูปที่ 2.6 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)

2.2.3.2 ปรากฏการณ์ผสมคลื่น 4 ขบวน

ปรากฏการณ์ผสมคลื่น 4 ขบวน (Four-wave mixing :FWM) เป็นวิธีที่ใช้สำหรับการสร้างคลื่นเฟสคอนจูเกต (Phase conjugate) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดในตัวกลางแบบไม่เชิงเส้นถูกกระตุ้นด้วยคู่ของลำแสงเลเซอร์ที่มีทิศการเคลื่อนที่ตรงข้ามกัน เมื่อสัญญาณของลำแสงตกกระทบภายในตัวกลาง ลำแสงที่ 4 จะถูกสร้างขึ้น ซึ่งลำแสงนี้มีทิศทางการเคลื่อนที่ตรงข้ามกับลำแสงตกกระทบ และเป็นแบบผันกลับเวลากับลำแสงตกกระทบ โดยการคับปลิงลำแสงทั้ง 4 ลำนี้ในตัวกลางโพโตรีแฟรกทีฟ [1]

จากรูปที่ 2.8 เราพิจารณาการแทรกสอดลำแสงทั้ง 4 ลำในตัวกลางโพโตรีแฟรกทีฟ ซึ่งกำหนดให้ลำแสงทั้งหมดมีความถี่เชิงมุมเหมือนกัน เท่ากับ ω สามารถเขียนสนามไฟฟ้าดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E = \sum_{j=1}^4 A_j \exp[i(\omega t - \mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r})] \quad (2.56)$$

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

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

ในสมการที่ (2.80) กำหนดให้ เวกเตอร์คลื่นทั้งหมดอยู่ในระนาบเดียวกัน และคลื่นทั้งหมดมีทิศทางโพลาไรซ์ตั้งฉากกับระนาบของคลื่น ในกรณีที่ $A_3 = A_4 = 0$ ดังนั้นมีคลื่นแสงเพียง 2 ลำ และมีเกรตติงโฟโตรีแฟรคทีฟเพียงตัวเดียว สามารถเขียนสมการทั้ง 2 ได้ ดังนี้

$$\frac{d}{dz} A_1 = -\frac{1}{2} \Gamma (A_1 A_2^*) A_2 / I_0 \quad (2.57)$$

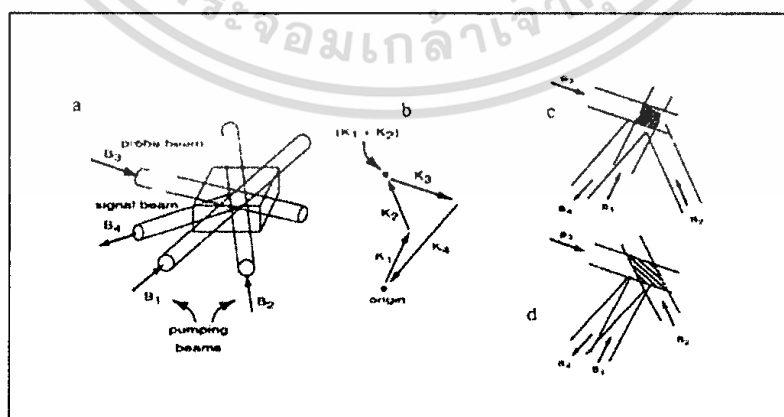
$$\frac{d}{dz} A_2 = -\frac{1}{2} \Gamma (A_1^* A_2) A_1 / I_0 \quad (2.58)$$

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

$$\Gamma = i \frac{2\pi n_1}{\lambda \cos \theta} e^{-i\phi} = \gamma + i2\beta \quad (2.59)$$

และ

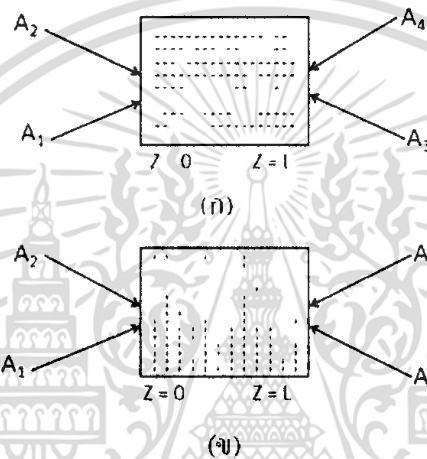
$$\gamma = \frac{2\pi n_1}{\lambda \cos \theta} \sin \phi \quad \text{และ} \quad \beta = \frac{\pi n_1}{\lambda \cos \theta} \cos \phi \quad (2.60)$$



รูปที่ 2.7 แสดงการผสมคลื่นสี่ขบวน (Four -Wave Mixing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.7 (a) ลำแสง B_3 เป็นลำแสงหลักที่ผ่านเข้าไปติดกับลำแสงอื่น นั่นคือ ลำแสง B_1 และ B_2 ซึ่งทำให้เกิดเป็นลำแสง B_4 มุมของลำแสงใหม่สามารถคำนวณได้จากไดอะแกรมของเวกเตอร์คลื่น ดังแสดงในรูป (b) ซึ่งแสดงรูปแบบการเกิด B_4 ได้ดังรูป (c) (d) เป็นการแทรกสอดระหว่าง B_3 และ B_2 โดยมีการสะท้อนของลำแสง B_1 เข้าไปแทรกสอด ทำให้เกิด B_4



รูปที่ 2.8 แสดงปรากฏการณ์การผสมคลื่น 4 ขบวนในตัวกลางโฟโตรีเฟรคทีฟ [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)

ในสมการที่ (2.57) และ (2.58) เทอมของ $A_1 A_2^*$ แสดงถึงแอมพลิจูดของรูปแบบเกรตติงด้วย A_1 และ A_2 ซึ่งแสดงถึงคลื่นทั้ง 4 โดยทั่วไปมีเกรตติง 6 ตัวในตัวกลาง ในกรณีปรากฏการณ์การผสมคลื่น 4 ขบวน แต่สำหรับคลื่นเฟสคอนจูเกตค่าของเวกเตอร์คลื่นมาจากคู่ของลำแสงที่เดินทางในทิศทางตรงข้ามกัน

$$\mathbf{k}_2 = -\mathbf{k}_3 \quad \text{และ} \quad \mathbf{k}_4 = -\mathbf{k}_1 \quad (2.61)$$

ถ้าสมมุติว่าคลื่นเหล่านั้นเดินทางเข้าในตัวกลางที่สมมาตรดังแสดงในรูป 2.10 แล้วมีเกรตติงที่แตกต่างกัน 4 ตัว ซึ่งเกรตติงเหล่านี้แสดงโดย $(A_1 A_2^* + A_3 A_4^*)$, $(A_2 A_4^* + A_1 A_3^*)$, $(A_2 A_3^*)$ และ $(A_1 A_4^*)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเทอมแรกเป็นเกรตติงแบบส่งผ่าน (Transmission grating) และ เทอมที่สองเป็น เกรตติงแบบสะท้อน (Reflection grating) ส่วนเทอมที่เหลือเป็นเกรตติง $2k$ (เกรตติงที่มีเวกเตอร์คลื่น $2k$) เราจะพิจารณาเพียง เกรตติงแบบส่งผ่าน ($A_1A_2^* + A_3A_4^*$) ให้เพิ่มขึ้นตามการแทรกสอดระหว่างลำแสง เรียกว่าการประมาณ เกรตติง

2.3 ปรากฏการณ์เฟสคอนจูกันเชิงแสง

เฟสคอนจูเกตเป็นอุปกรณ์ทางแสงที่สามารถสร้างได้จากแบบจำลองของเวลาย้อนกลับ (time-reversed) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบ ปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกตนั้นมีความสำคัญในระบบทางแสง ซึ่งต้องการการส่งผ่านคลื่นแสงผ่านไปยังตัวกลางที่เกิดการกระเจิง เช่น ในบรรยากาศ โดยการเกิดคลื่นเฟสคอนจูเกตเป็นปรากฏการณ์ในทัศนศาสตร์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear optics) ในผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟ (Photorefractive crystals) อาทิเช่น แบเรียมไททาเนต ($BaTiO_3$), สตรอนเทียมแบเรียมไนโอเบต ($Sr_xBa_{1-x}Nb_2O_6$ หรือ SBN), บิสมัทซิลิคอนออกไซด์ (BSO) ซึ่งเป็นผลึกที่มีประสิทธิภาพสำหรับการเกิดคลื่นเฟสคอนจูเกต

การเกิดคลื่นเฟสคอนจูเกต (Phase conjugate waves) ถ้าการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกอธิบาย ด้วยสมการ

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \cos[\omega t - \mathbf{k}z - \phi(z)] \quad (2.52)$$

เมื่อ E_0 คือ แอมพลิจูดสนามไฟฟ้าเป็นค่าคงตัว ในหน่วยนิวตันต่อคูลอมบ์ (N/C)

ω คือ ความถี่เชิงมุม ในหน่วยเรเดียนซ์ต่อวินาที (rad/s)

k คือ เลขคลื่น ในหน่วยต่อเมตร (m^{-1})

ϕ คือ เฟสของคลื่น ในหน่วยเรเดียนซ์ (rad.)

การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้างกล่าวในตัวกลางสามารถแสดงการเคลื่อนที่ของหน้าคลื่นได้ดัง สมการ

$$\mathbf{k}z + \phi(z) = k_0 \quad ; \quad k_0 \text{ เป็นค่าคงตัว} \quad (2.53)$$

คลื่นเฟสคอนจูเกตของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสมการที่ (2.76) สามารถเขียนได้เป็น

$$\mathbf{E}_c = \mathbf{E}_0 \cos[\omega t + \mathbf{k}z + \phi(z)] \quad (2.54)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราทราบว่าหน้าคลื่นของ E_c เหมือนกับหน้าคลื่นของ E ซึ่งคลื่นทั้งสองเหล่านี้เป็นรูปแบบของเฟสคอนจูเกต ซึ่งมีหน้าคลื่นเหมือนกัน แต่เคลื่อนที่ในทิศตรงกันข้าม ในหลักการพื้นฐานคลื่นเฟสคอนจูเกตสามารถสร้างโดยใช้กระจกที่มีผิวหน้าเหมือนกับหน้าคลื่นของคลื่นตกกระทบ เทคนิคนี้เรียกว่าการปรับหน้าคลื่นแสง (Adaptive optics) ซึ่งเราต้องรู้ว่าหน้าคลื่นของรังสีที่ผ่านเข้ามามีลักษณะแบบไหน การใช้กระจกที่สามารถเปลี่ยนรูปได้ที่ขับเคลื่อนด้วยตัวกระตุ้นทางกล โดยผิวหน้าของกระจกสามารถเปลี่ยนตามลักษณะของหน้าคลื่นที่ผ่านเข้ามา และมีเทคนิคอินเตอร์เฟอโรเมทรี (Interferometry technique) สามารถวัดลักษณะหน้าคลื่นของรังสีที่ผ่านเข้ามา ซึ่งผลที่ได้จากการวัดลักษณะของหน้าคลื่นด้วยวิธีนี้สามารถนำมาใช้เพื่อเตรียมกระจกให้มีลักษณะผิวหน้าเหมือนกับหน้าคลื่นของรังสีตกกระทบ



รูปที่ 2.9 แสดงหลักการพื้นฐานของเทคนิค การปรับหน้าคลื่นแสง (Adaptive optics)

การทดลองในปี ค.ศ. 1972 พบว่าหน้าคลื่นของรังสีที่ถูกกระเจิงกลับจากการถูกกระตุ้นด้วยการกระเจิงของบริลลูอิน (Stimulated Brillouin scattering : SBS) เป็นแบบจำลองเวลาผันกลับของลำแสงที่กระตุ้นจากลำแสงตกกระทบ โดยยิงรังสีจากเลเซอร์พัลส์แบบพัลส์เดี่ยวเข้าไปในเซลล์ SBS เมื่อตรวจสอบรังสีและหน้าคลื่นที่กระเจิงกลับ พบว่ารังสีนั้นมีลักษณะเหมือนกับรังสีตกกระทบ จากการทดลองพบว่าคลื่นเฟสคอนจูเกตใน SBS มีอัตราความเข้มแสงเป็นสองเท่าของคลื่นที่มีเฟสไม่ตรงกัน ดังนั้นสัมประสิทธิ์ความเข้มแสงแบบเอ็กโพเนนเชียลเป็นความแตกต่างอย่างมากกับความเข้มแสงของคลื่นแสงเหล่านั้น และไม่กี่ปีต่อมาผลการทดลองข้างต้นถูกนำเสนอและแสดงให้เห็นว่าปรากฏการณ์การผสมคลื่นแสง 4 ขบวน (Optical four-wave mixing :FWM) สามารถสร้างคลื่นเฟสคอนจูเกตได้ โดย FWM ในทัศนศาสตร์ตัวกลางแบบไม่เชิงเส้นถูกกระตุ้นด้วยคู่ของคลื่นที่เคลื่อนที่ในทิศตรงกันข้าม เมื่อลำแสงที่ 3 เป็นลำแสงตกกระทบในตัวกลาง

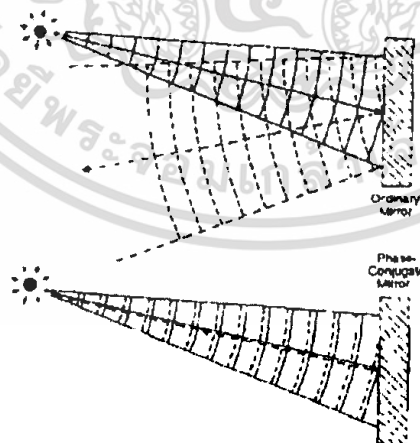
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และคลื่นที่ 4 ถูกสร้างขึ้นมีเฟสตรงกับคลื่นของลำแสงตกกระทบ ซึ่งกระบวนการนี้สามารถตีความได้ว่าเป็นฮอโลกราฟีที่เกิดขึ้นพร้อมกัน ในตัวกลางจะมีลำแสงตกกระทบและลำแสงอีกลำหนึ่งที่ถูกกระตุ้น ลักษณะความเข้มแสงที่แทรกสอดกันขึ้นอยู่กับค่าแอมพลิจูดสนามไฟฟ้าของคลื่นทั้งสอง ในตัวกลางแบบไม่เชิงเส้นบางชนิดสามารถเขียนค่าดัชนีหักเหแสง ดังสมการ[1]

$$n = n_0 + n_2 I \quad (2.55)$$

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

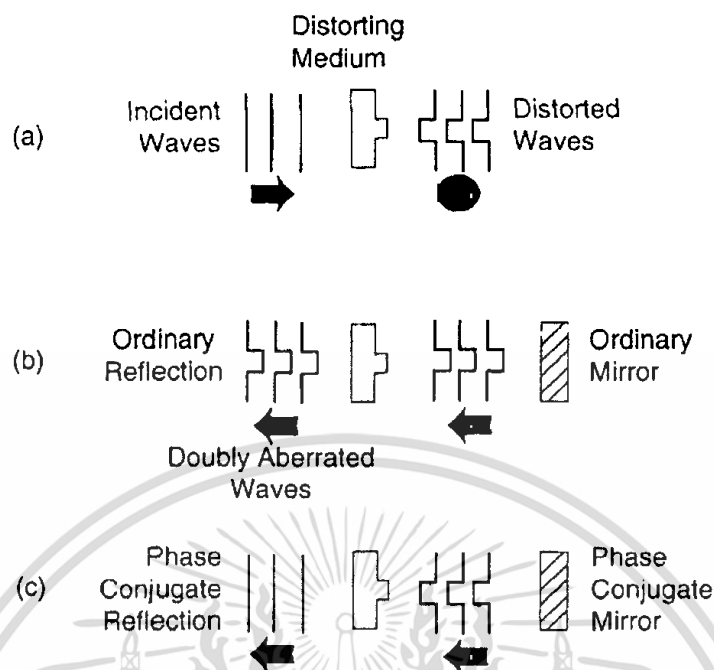
ทั้ง SBS และ FWM เป็นกระบวนการในการเกิดฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 ซึ่งต้องการรังสีที่มีความเข้มแสงมาก ๆ ระดับเมกะวัตต์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (MW/cm^3) สำหรับการสร้างที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งเทคนิคทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นสำหรับการสร้างคลื่นเฟสคอนจูเกตไม่จำเป็นต้องรู้ลักษณะหน้าคลื่นของรังสีที่ผ่านเข้ามา เนื่องจากการผสมคลื่นแสง 4 ขบวน ในตัวกลางแบบไม่เชิงเส้นจะเหมือนกับฮอโลกราฟีที่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน ซึ่งตัวกลางฮอโลกราฟีสามารถสร้างคลื่นเฟสคอนจูเกตได้ แต่ความเข้มแสงในระดับวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (W/cm^2) ก็สามารถสร้างการผสมคลื่น 4 ขบวน และคลื่นเฟสคอนจูเกตอย่างมีประสิทธิภาพได้



รูปที่ 2.10 แสดงการเปรียบเทียบ คุณสมบัติการสะท้อนของกระจกธรรมดา(Ordinary Mirror)

กับกระจกเฟสคอนจูเกต (Phase Conjugate Mirror)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของ PCM กับ กระจกแบบธรรมดา เมื่อคลื่นตกกระทบเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางซึ่งบิดเบือน

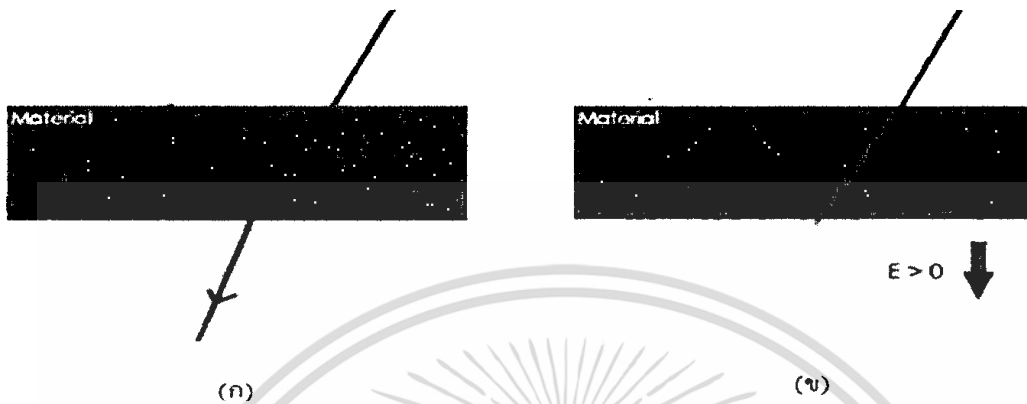
จากรูปที่ 2.11 (a) แสดงคลื่นตกกระทบเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางซึ่งมีการบิดเบือน โดยเมื่อคลื่นตกกระทบเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางซึ่งมีการบิดเบือนนั้นจะทำให้หน้าคลื่นที่ผ่านออกมานั้นมีการผิดรูปไปจากหน้าคลื่นตกกระทบ และเมื่อตกกระทบกระจกแบบธรรมดาก็จะเกิดการสะท้อนกลับโดยกระจกแบบธรรมดานั้นจะทำให้หน้าคลื่นที่สะท้อนกลับนั้นมีหน้าคลื่นตรงข้ามกับหน้าคลื่นที่ผ่านตัวกลางออกมา ดังรูป (b) แต่เมื่อตกกระทบกระจกแบบเฟสคอนจูเกตจะทำให้หน้าคลื่นที่สะท้อนกลับนั้นมีหน้าคลื่นเหมือนกันกับหน้าคลื่นเดิมที่ผ่านตัวกลางออกมอดังรูป (c)

2.3.1 ปรากฏการณ์ Beam Fanning

Beam fanning คือกระบวนการคัปปลิงของลำแสงสองลำ (two-beam coupling) ในกรณีนี้จะมีเพียงลำแสงเดียวที่ตกกระทบบนผลึกและพลังงานของมันจะถูกถ่ายโอนเข้ามาในแสงที่มีการกระเจิง ซึ่งเป็นผลมาจากการถ่ายโอนพลังงาน แสงที่เกิดการกระเจิงจะถูกขยายและแผ่ออกโดยจะสังเกตเห็นได้ ซึ่งทิศทางการถ่ายโอนพลังงานสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการกลับขั้วของสนามไฟฟ้าที่ใช้ ปรากฏการณ์ Beam Fanning สามารถทำให้ลำแสงที่แผ่ออกนั้นขยายหรือลดได้ขึ้นอยู่กับขั้วของสนามไฟฟ้าที่ใช้ ในกรณีนี้ขั้วของสนามไฟฟ้า

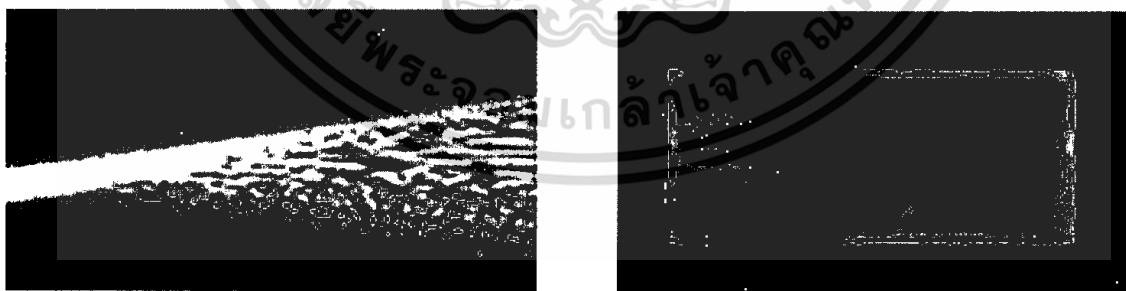
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ใช้จะมีผลให้ปรากฏการณ์ Beam fanning ขยายออกมากซึ่งกำลังของลำแสงที่ส่งผ่านตัวกลางโฟโตรีแฟรกทีฟออกมานั้นจะลดลง



รูปที่ 2.12 แสดงลำแสงเมื่อเดินทางผ่านผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟ (ก) ขณะที่ยังไม่เกิด Beam fanning (ข) ขณะเกิด Beam fanning ซึ่งทำให้ลำแสงที่ส่งผ่านออกมามีความเข้มลดลง

Beam fanning จะไม่สมมาตรและลำแสงจะมีการเบนของลำแสงในผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟ ส่วนหนึ่งของลำแสงที่ตกกระทบจะเกิดการกระเจิงในผลึกที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันและมีการเติมสารเจือในผลึกนั้น ส่วนที่เหลือของลำแสงตกกระทบจะเกิดอันตรกิริยากับส่วนที่กระเจิงโดยการผสมคลื่นสองขบวน ซึ่งนำไปสู่การขยายของแสงที่กระเจิงในทิศทางของการถ่านไอออนพลังงาน



รูปที่ 2.13 แสดงลำแสงขณะเกิดปรากฏการณ์ Beam fanning

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ศึกษาคุณสมบัติของผลึก

ตัวกลางที่ใช้ในการสร้างลำแสงเลี้ยวเบนของปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสง จะต้องเป็นตัวกลางที่มีคุณสมบัติโพโตรีแฟรกทีฟที่ดี ซึ่งเป็นผลึกแบบทัศนศาสตร์ไม่เชิงเส้น และเป็นผลึกที่มีความเป็นอเล็กโทรออปติกส์ (Electro optic) โดยผลึกที่นำมาใช้ในการทดลองศึกษาลำแสงเลี้ยวเบนของปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงนั้น คือ ผลึกแบเรียมไททานเตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม ($\text{Ce} : \text{BaTiO}_3$)

3.1.1 ผลึกแบเรียมไททานเต

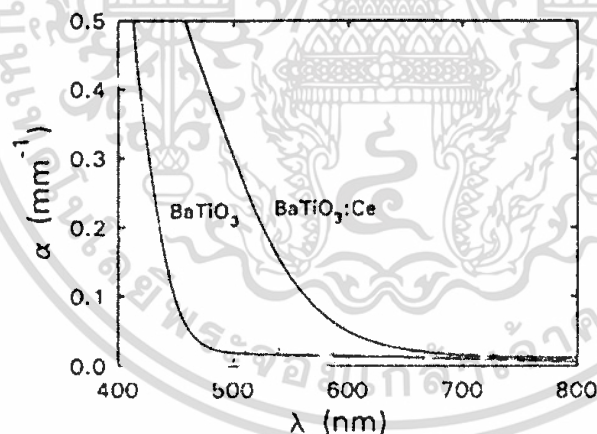
ผลึกแบเรียมไททานเต (BaTiO_3) เป็นหนึ่งในวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric material) ชนิดแรก ๆ ที่ได้ถูกค้นพบ และเป็นวัสดุที่ได้รับการยอมรับว่าเป็นตัวกลางที่มีคุณสมบัติโพโตรีแฟรกทีฟที่ดีเป็นอันดับหนึ่ง ซึ่งจัดอยู่ในสารประกอบแบบ ABO_3 ที่มีโครงสร้างอยู่ในตระกูลเพอโรฟสไกต์ (Perovskite) ของผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริก โดยสารประกอบชนิดอื่นที่อยู่ในตระกูลนี้เหมือนกัน เช่น KNbO_3 , KTaO_3 , PbTiO_3 , LiNbO_3 และ SrTiO_3 ซึ่งสารประกอบประเภทนี้สามารถเปลี่ยนโครงสร้างได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยอุณหภูมิวิกฤตที่มีผลต่อการเปลี่ยนโครงสร้างผลึก (Curie temperature : T_c) ประมาณ 120 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิสูงเกินกว่าอุณหภูมิวิกฤตโครงสร้างผลึกเป็นแบบลูกบาศก์ (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 5 องศาเซลเซียสหน่วยเซลล์จะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นแบบออร์ทอโรมบิก (Orthorhombic) มีจุดกลุ่มแบบ $2mm$ (จุดกลุ่มสมมาตร $4mm$) ที่อุณหภูมิห้องหน่วยเซลล์จะเกิดไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้า (Electric dipole moment) ขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งของไอออน Ba^{2+} กับ Ti^{4+} ที่สัมพันธ์กับไอออน O^{2-} ทำให้โครงสร้างผลึกเกิดความไม่สมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1(ข)

การเปลี่ยนตำแหน่งของไอออนในหน่วยเซลล์ทำให้เกิดการสร้างแกนโพลาริไซด์ หรือแกนแสง (c-axis) ของผลึกในทิศทางการเคลื่อนที่ของไอออน ที่อุณหภูมิห้องสามารถสังเกตเห็นการอิมพัลส์ของแกนโพลาริไซด์ (P_r) มีค่าประมาณ 8×10^{14} esu cm^2 ซึ่งคุณสมบัติที่ทราบกันดีในสารประกอบแบบเพอโรฟสไกต์ เช่น การเกิดปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect) และการเกิดฮาร์มอนิกอันดับที่สองจากพัลส์ที่เกิดขึ้นเองในผลึก BaTiO_3 โดยการโพลาริไซด์ที่สร้างขึ้นอาจจะมีทิศตามแกนของลูกบาศก์ในผลึกที่ถูกสร้างขึ้น $\langle 001 \rangle$ ซึ่งผลึก BaTiO_3 มีเฟส/โครงสร้างแบบเตตระโกนอล [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

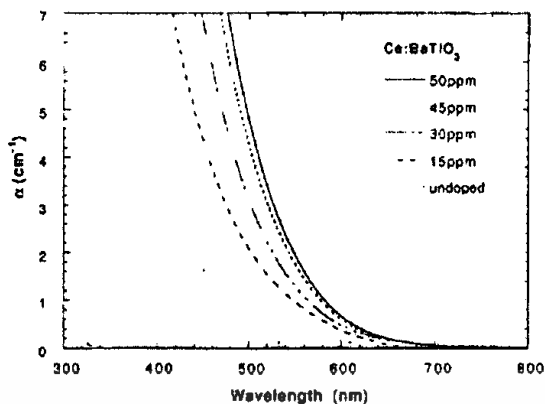
3.1.2 ผลึกแบเรียมไททานเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม

ผลึกแบเรียมไททานเนตที่ไม่ได้เจือด้วยอะตอมของสารเจือเป็นวัสดุโพโตรีแฟรกทีฟที่ตอบสนองต่อสเปกตรัมแสงในช่วงความยาวคลื่นสีเขียวได้ดีที่สุดเพราะระดับพลังงานของผู้ให้ (Donor) อยู่เหนือแถบวาเลนซ์ประมาณ 2.4 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังนั้นจึงต้องเติมสารเจือซึ่งใช้พลังงานในการกระตุ้นต่ำ ๆ เพื่อขยายช่วงการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงที่กว้างขึ้น จึงมีการทดลองเจืออะตอมสารเจือหลายชนิดลงในสารประกอบ BaTiO_3 เช่น Fe, Co, Ce, และ Rh ถึงแม้ผลึก BaTiO_3 ชนิดเจือด้วย Fe ไม่มีความสำคัญต่อการพัฒนาประสิทธิภาพของผลึกโพโตรีแฟรกทีฟ แต่สามารถเพิ่มความเป็นวัสดุโพโตรีแฟรกทีฟของผลึก BaTiO_3 ในการตอบสนองต่อช่วงความยาวคลื่นแสงสีแดงและอินฟราเรด โดยการเจือด้วยอะตอมโรเดียม (Rh) และการเจือด้วยอะตอมโคบอล (Co) ผลึกจะมีความเป็นวัสดุโพโตรีแฟรกทีฟ และสามารถตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรดระยะใกล้ ส่วนสารเจืออื่นที่ได้รับความนิยมมาก คือ อะตอมซีเรียม (Ce) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยแสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) กับฟังก์ชันของความยาวคลื่นแสง (λ) สำหรับผลึกแบเรียมไททานเนตที่ไม่ได้เติมอะตอมของสารเจือกับผลึกแบเรียมไททานเนตที่เจือด้วยอะตอมซีเรียม จากกราฟพบว่าเมื่อเติมสารเจือซีเรียมในผลึกแบเรียมไททานเนตทำให้ผลึกสามารถตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงที่กว้างขึ้นและมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบที่ความยาวคลื่นเดียวกัน

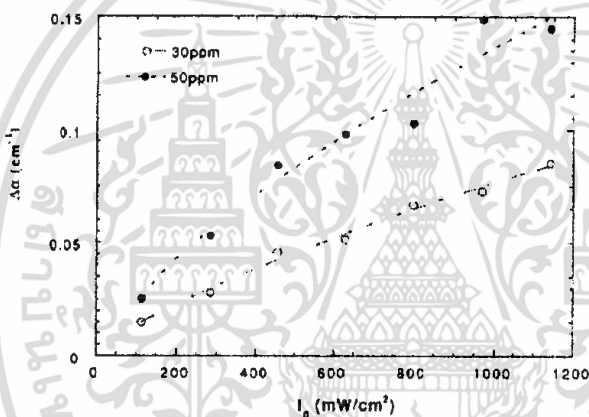


รูปที่ 3.2 แสดงกราฟการดูดกลืนแสงของผลึกแบเรียมไททานเนตที่ไม่ได้เติมอะตอมของสารเจือกับผลึกแบเรียมไททานเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงกราฟการดูดกลืนแสงของผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียมที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ



รูปที่ 3.4 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ถูกเหนี่ยวนำของผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม กับความเข้มแสงโดยใช้แสงความยาวคลื่น 514 นาโนเมตร

การใช้แบบจำลองกับดักอิเล็กตรอนแบบลึกและตื้น (Deep-and shallow-trap model) ซึ่ง Yang et al. ใช้อธิบายการดูดกลืนแสงและคุณสมบัติเด่นของโฟโตรีแฟรกทีฟในผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยแสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) กับฟังก์ชันของความยาวคลื่นแสง (λ) สำหรับผลึกแบเรียมไททาเนตที่เจือด้วยอะตอมซีเรียมที่มีความเข้มข้นของการเจือแตกต่างกัน 4 ค่า และผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดไม่เจือด้วยอะตอมของสารเจือ และพลอตกราฟผลของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ถูกเหนี่ยวนำ ($\Delta\alpha$) สำหรับผลึกตัวอย่างที่มีโครงสร้างแบบลูกบาศก์ ดังแสดงในรูป 3.4 ซึ่งค่า ($\Delta\alpha$) จากกราฟเป็นไปตามทฤษฎีในสมการ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอะตอมซีเรียมค่าสัมประสิทธิ์อิเล็กโทรออปติกส์ และอัตราการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น การคับปลิงแสงมากขึ้น และการเหนี่ยวนำแสงเข้าใกล้ความเป็นเชิงเส้นมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของผลึกแบเรียมไททานเตต

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 °C			
ความหนาแน่น (Density)	6.06 g/cm ² ที่อุณหภูมิ 26 °C			
ความแข็ง (Hardness)	Mohs 5			
ช่องว่างพลังงาน (Bandgap)	3.2 eV ที่อุณหภูมิ 300 °K ผลึกเดี่ยว			
ช่วงการส่งผ่าน (Transmission range)	0.43 – 6.30 μm			
ดัชนีหักเหแสง (Refractive indices)	λ (nm)	515	633	800
	n _o	2.4912	2.4160	2.3681
	n _e	2.4247	2.3630	2.3235
ค่าสัมประสิทธิ์ออปติคัล (Electro optic coefficients)	$r_{13}^T = 8.0 \pm 2.0\text{ pm/v}$			
	$r_{33}^T = 105 \pm 10\text{ pm/v}$			
	$r_{42}^T = 1300 \pm 100\text{ pm/v}$			
คุณสมบัติโฟโตรีแฟรกทีฟ (Photorefractive properties)	Reflectivity of SPPC (0° - cut)			
	Ce: BaTiO ₃	50 – 70% สำหรับ λ = 515 nm		
	Pure BaTiO ₃	40 – 60% สำหรับ λ = 515 nm		
	Ce: BaTiO ₃	50 – 80% สำหรับ λ = 633 nm		
	Pure BaTiO ₃	40 – 60% สำหรับ λ = 633 nm		
ค่าคงตัวการผสมคลื่น 2 ขบวน	10 – 40 cm ⁻¹			
การดูดกลืนแสง (Absorption loss)	λ (nm)	515	633	800
	α (cm ⁻¹)	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

ตารางที่ 3.3 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม

โครงสร้างผลึก (Crystal structure)	tetragonal 4 m			
	10 °C (50 °F) < T < 132 °C (269.6 °F)			
ช่วงการส่งผ่าน (Transmission range)	0.45 – 6.30 μm			
ดัชนีหักเหแสง (Refractive indices)	λ (nm)	515	633	800
	n_o	2.4921	2.4160	2.3681
	n_e	2.4247	2.3630	2.3235
ค่าสัมประสิทธิ์ออปติคัลโทรอปติกส์ (Electro optic coefficients)	$r_{13}^T = 11.7 \pm 1.9 \text{ pm/v}$			
	$r_{33}^T = 112 \pm 10 \text{ pm/v}$			
	$r_{42}^T = 1920 \pm 180 \text{ pm/v}$			
คุณสมบัติโพโตรีแฟรกทีฟ (Photorefractive properties)	Reflectivity of SPPC (0° - cut)			
	50 – 70% (max: 77%)	สำหรับ $\lambda = 515 \text{ nm}$		
	50-80% (max: 86.8%)	สำหรับ $\lambda = 633 \text{ nm}$		
ค่าคงตัวการผสมคลื่น 2 ขบวน (Two-wave mixing coupling constant)	10– 40 cm^{-1}			
การดูดกลืนแสง (Absorption loss)	λ (nm)	515	633	800
	α (cm^{-1})	3.392	0.268	0.005

หมายเหตุ ช่วงการใช้งานของผลึกอยู่ระหว่างอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ถึง 120 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการเปลี่ยนเฟสของผลึกเมื่อคลื่นแสงตกกระทบบัวกลาง และทำการขัดผิวหน้าผลึกในลักษณะต่าง ๆ เพื่อการใช้งานตามความเหมาะสม เช่น

- ขัดผิวหน้าผลึก 1 ด้าน เพื่อใช้สร้างกระจกในการกระตุ้นสร้างคลื่นเฟสคอนจูเกต (Self Pumped Phase Conjugate : SPPC)
- ขัดผิวหน้าผลึก 2 ด้าน เพื่อใช้สร้างการผสมคลื่น 2 ขบวน (Two wave mixing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ขัดผิวหน้าผลึกทั้ง 6 ด้าน เพื่อใช้กระตุ้นในการสร้างคลื่นเฟสคอนจูเกต(Self Pumped Phase Conjugate : SPPC)
- ขนาดมาตรฐานของผลึกที่นิยมนำมาใช้ เช่น 5 x 5 x 5 มิลลิเมตร หรือ 5 x 5 x 2 มิลลิเมตร

3.2 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

สำหรับการทดลองเพื่อศึกษาการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงในผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ทางแสงที่มีความละเอียดพอสมควร และในการติดตั้งชุดการทดลองต้องติดตั้งบนโต๊ะทดลองทางแสง (Isolate table) เพื่อลดการสั่นของระบบที่เกิดจากการรบกวนจากสิ่งแวดล้อม เพราะระบบการทดลองทางแสงต้องการความนิ่ง ห้ามมีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นระหว่างทำการทดลอง และสิ่งสำคัญห้องปฏิบัติการทางแสงต้องเป็นห้องมืด เพื่อสามารถสังเกตลำแสงเลเซอร์ได้อย่างชัดเจน ไม่มีแสงรบกวนจากภายนอก ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลองมีดังต่อไปนี้

3.2.1 อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกต ในผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม ประกอบด้วย

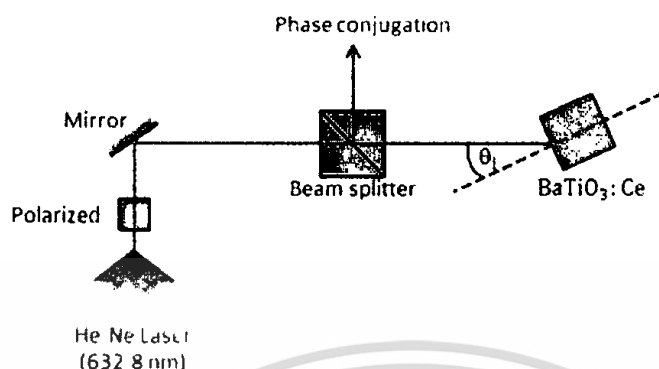
1. ผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม ($Ce : BaTiO_3$) มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ขนาด กว้าง 6 มิลลิเมตร ยาว 6 มิลลิเมตร และ สูง 6.5 มิลลิเมตร ($a \times b \times c$) ตามลำดับ ซึ่งความสูง c เป็นแกนแสงของผลึก (c -axis)
2. เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแสงสีแดง
3. แผ่นโพลาไรเซอร์ (Polarizer) 2 แผ่น เนื่องจากเลเซอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นแสงไม่โพลาไรซ์จึงต้องติดตั้งไว้ในชุดการทดลองนี้ด้วยเพื่อให้ลำแสงเลเซอร์กลายเป็นแสงโพลาไรซ์และอีก 1 แผ่น สำหรับเพื่อใช้ตรวจสอบแกนการโพลาไรซ์ของแสงตกกระทบ และการโพลาไรซ์ของลำแสงต่าง ๆ ในการทดลอง
4. ตัวแยกลำแสง (Beam splitter) มีลักษณะเป็นลูกบาศก์ ขนาด กว้าง 2.5 เซนติเมตร ยาว 2.5 เซนติเมตร และสูง 2.5 เซนติเมตร ทำหน้าที่เป็นตัวแยกแสงเลเซอร์ออกเป็น 2 ลำ คือ แสงลำที่ 1 และลำที่ 2 ที่มีความเข้มแสงเท่ากัน แต่ความเข้มแสงที่ถูกแยกจะลดลงครึ่งหนึ่งของแสงจากเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

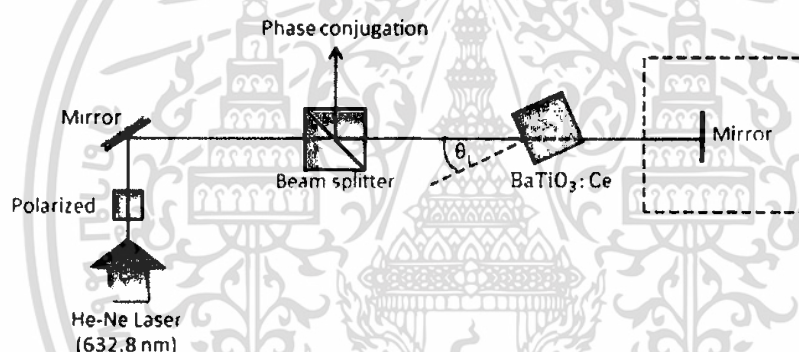
5. กระจก (Mirror) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว ตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 750 นาโนเมตร ทำหน้าที่สะท้อนแสงในการศึกษาปรากฏการณ์เฟสคอนจูกันเชิงแสง
6. ฉากรับแสง (Scene) ใช้กระดาษสีขาว ทำหน้าที่รับลำแสงเลี้ยวเบนจากผลึก เพื่อให้สามารถสังเกตภาพ และสามารถบันทึกภาพได้ชัดเจน
7. รางเลื่อน (Linear guide) ทำจากอลูมิเนียม ซึ่งสามารถเลื่อนในระนาบแกน x ได้ 15 เซนติเมตร และในระนาบแกน y ได้ 100 เซนติเมตร ทำหน้าที่เลื่อนผลึกเพื่อให้สามารถปรับมุมตกกระทบแสงเลเซอร์ที่ผิวหน้าของผลึกได้ ในการหามุมตกกระทบ และสังเกตเห็นลำแสงที่มีความเข้มมากที่สุด
8. แท่นวางผลึก (Stage) สูงประมาณ 15 เซนติเมตร จากพื้นโต๊ะทดลอง
9. มิเตอร์วัดความเข้มแสงเลเซอร์ (Power meter) ใช้วัดความเข้มแสงของลำแสงตกกระทบ และลำแสงต่าง ๆ ในการทดลอง
10. แวนกันแสงเลเซอร์ เพื่อป้องกันแสงเลเซอร์เข้าตาระหว่างการทดลอง
11. กล้องถ่ายภาพ (CCD) ใช้บันทึกภาพของลำแสงที่เกิดขึ้น
12. อุปกรณ์อื่น ๆ เช่น ชุดหกลีเยียม ชุดทำความสะอาดเลนส์ ไฟฉาย

3.2.2 การจัดระบบการทดลอง

ในการทดลองเพื่อศึกษาการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูกันเชิงแสง โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ตอน สำหรับเรโซเนเตอร์ชนิดที่ 1 และเรโซเนเตอร์ชนิดที่ 2 แผนภาพการจัดอุปกรณ์การทดลองแสดงในรูปที่ 3.5 สำหรับการทดลองโดยใช้เรโซเนเตอร์ชนิดที่ 1 และการทดลองในรูปที่ 3.6 สำหรับการทดลองโดยใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 2 โดยในการทดลองใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน (He-Ne laser) มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร เป็นแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งลำแสงจากเลเซอร์ (Light source) ถูกแยกเป็น 2 ลำที่มีแกนโพลาไรซ์เหมือนกับลำแสงเดิม โดยแสงลำที่ 1 ผ่านตัวแยกแสงไปตกกระทบที่ผิวหน้าของผลึกแบเรียมไททานเตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม และแสงลำที่ 2 หักเหออกจากตัวแยกแสงไปตกกระทบบนกระจก ซึ่งต้องหมุนตัวแยกแสงเพื่อให้แสงลำที่ 2 ทำมุม 90 องศา กับลำแสงจากเลเซอร์เพื่อให้ลำแสงทั้ง 2 มีความเข้มแสงใกล้เคียงกันมากที่สุดเพื่อให้เหมาะสมต่อการเกิดปรากฏการณ์โพโตรีแฟรคทีฟซึ่งเป็นปรากฏการณ์พื้นฐานที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูกันเชิงแสง ในการทดลองทั้งสองตอนจะใช้ลำแสงที่ 1 เพียงลำเดียวไปตกกระทบที่ผิวหน้าของผลึกและปิดลำแสงที่ 2 ไว้ โดยจะต้องปรับให้ลำแสงไปตกกระทบกับผลึกด้วยมุมตกกระทบที่เหมาะสมตามเงื่อนไขต่างๆจึงจะสามารถเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูกันเชิงแสงขึ้นมาได้



รูปที่ 3.5 แสดงแผนภาพการจับอุปกรณ์การทดลองสำหรับเรโซเนเตอร์แบบที่ 1



รูปที่ 3.6 แสดงแผนภาพการจับอุปกรณ์การทดลองสำหรับเรโซเนเตอร์แบบที่ 2

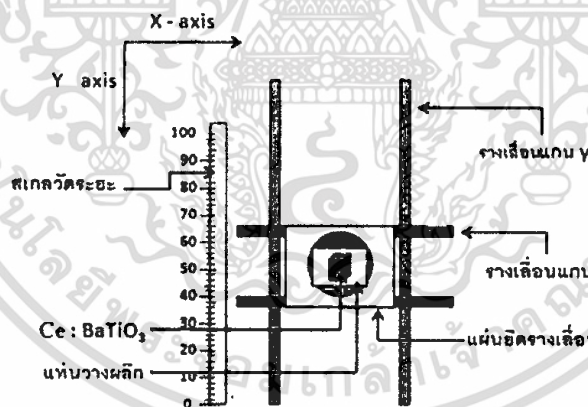
3.3 ขั้นตอนการทดลองการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสง

ขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงตกกระทบในผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม โดยมีวิธีการทดลองตามขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. จัดอุปกรณ์การทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.5 และ 3.6 ซึ่งอุปกรณ์ทั้งหมดติดตั้งบนโต๊ะทดลองทางแสง เพื่อลดการรบกวนจากการสั่นสะเทือน และอุปกรณ์ทุกชิ้นต้องสะอาดปราศจากฝุ่นเพื่อลดการกระเจิงของแสงเมื่อตกกระทบอุปกรณ์ และต้องทำการทดลองในห้องมืด
2. ขั้นตอนการจัดอุปกรณ์การทดลองต้องปรับแนวการเดินทางของแสง (Alignment) ให้เป็นเชิงเส้นอยู่ในระดับเดียวกันทั้งแกน x และ แกน z โดยปรับระดับของแท่นยึดตัวเลเซอร์ และตั้งเกตลำแสงที่ส่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ออกมาจากตัวเลเซอร์อยู่ในระดับเดียวกัน และต้องปรับให้ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบบที่ตำแหน่งกลางของอุปกรณ์แต่ละชิ้น เพื่อลดการกระเจิงแสงที่ขอบของอุปกรณ์
3. ปรับลำแสงจากเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ให้ทิศการโพลาไรซ์ของแสงขนานกับแกนแสงของผลึก (c-axis) ตกกระทบบตัวแยกแสง ลำแสงถูกแยกออกเป็น 2 ลำ โดยลำที่ 1 ผ่านตัวแยกแสงไปตกกระทบบผลึกแบเรียมไททานเตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม และแสงลำที่ 2 หักเหจากตัวแยกแสง หมุนตัวแยกแสงเพื่อให้แสงลำที่ 2 ทำมุม 90 องศา กับลำแสงจากตัวเลเซอร์ ไปตกกระทบบนกระจก ปรับกระจกเพื่อให้แสงลำที่ 2 สะท้อนไปตกกระทบบและซ้อนทับกับแสงลำที่ 1 ตรงกลางผลึกพอดี เพื่อให้เหมาะสมในการเกิดปรากฏการณ์โพโตรีแฟรคทีฟ
 4. ในการวางผลึกบนแท่นวาง ต้องจัดให้แกนแสงของผลึกอยู่ในระนาบแกน z และเลื่อนแท่นวางผลึกที่ตั้งอยู่บนรางเลื่อน เพื่อปรับให้แสงเลเซอร์ตกกระทบบที่ตำแหน่งกลางของผลึกพอดี โดยปรับรางเลื่อนในแกน x และปรับรางเลื่อนในแกน y เพื่อให้แสงทั้ง 2 ลำ ตกกระทบบทำมุมที่เหมาะสมกับผลึก และเกิดลำแสงเลี้ยวเบนที่มีความเข้มแสงมากที่สุด
 5. ในการทดลองจะใช้ลำแสงลำที่ 1 เพียงลำเดียวที่ตกกระทบบบนผลึก ปรับระยะด้วยรางเลื่อนในแกน y ต้องปรับรางเลื่อนในแกน x ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เพื่อให้แสงอยู่ตรงกลางผลึกพอดี เพราะเมื่อเลื่อนตำแหน่งของผลึกไปทำให้มุมตกกระทบบของลำแสงเปลี่ยนไป จากนั้นอ่านค่ามุมตกกระทบบของลำแสง



รูปที่ 3.7 แสดงการปรับระยะผลึกด้วยรางเลื่อนในแกน x และ แกน y

6. บันทึกกำลังของลำแสง ณ ตำแหน่งต่างๆ ทำการจับเวลาเพื่อบันทึกเวลาในการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงที่มุมตกกระทบบต่างๆ
7. บันทึกภาพลำแสงจากปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงที่เกิดขึ้น ด้วยกล้องบันทึกภาพ CCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ในการทดลองใช้แหล่งกำเนิดแสงสีแดง จากเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ความยาวคลื่นแสง 632.8 นาโนเมตร ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองจากเรโซเนเตอร์ต่างชนิดกัน
9. นำผลการทดลองบันทึกลงในตารางบันทึกผล เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากเรโซเนเตอร์ทั้งสองชนิด
10. นำผลการทดลองที่ได้ทั้งหมดมาวิเคราะห์ ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบที่กระทำกับผลึก พร้อมกับวิเคราะห์ค่า PC Reflectivity และเวลาในการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูชันเชิงแสงของเรโซเนเตอร์ทั้งสองชนิด โดยเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับเลเซอร์ฮีเลียมที่มีการทดลองมาแล้ว

หมายเหตุ : ระหว่างการทดลองควรระวังลำแสงเลเซอร์เข้าตา ป้องกันโดยใช้แว่นตัดแสงเลเซอร์ และไม่ควรเปิดเลเซอร์ทิ้งไว้นานเกินไป หรือเมื่อใช้งานเสร็จแล้วควรปิดสวิตซ์ไฟ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 มุมตกกระทบของลำแสงจากปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสง

จากการทดลองเพื่อศึกษาการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงในผลึกแบเรียมไททานเตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม โดยใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออนเป็นแหล่งกำเนิดแสงสีแดงความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ซึ่งผลึกที่ใช้ในการทดลอง แสดงในรูปที่ 4.1 โดยรูป 4.1(ก) ยังไม่ส่องสว่างลำแสงตกกระทบผลึก สังเกตว่าผลึกมีลักษณะใสเป็นสีส้มเหลือง แต่เมื่อส่องสว่างลำแสง ตกกระทบผลึกด้วยมุมตกกระทบที่เหมาะสม จะสังเกตเห็นว่าแสงจะมีการกระเจิงเต็มผลึก ดังแสดงในรูปที่ 4.1(ข)



รูปที่ 4.1 แสดงผลึกแบเรียมไททานเตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม (Ce:BaTiO_3) ที่ใช้ในการทดลอง

ก) เมื่อไม่มีแสงตกกระทบผลึก ข) เมื่อส่องสว่างลำแสงตกกระทบผลึก

เมื่อลำแสงตกกระทบผลึก ส่งผลให้อะตอมภายในผลึกถูกกระตุ้นจากลำแสงและเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ ผลึกสามารถสร้างสนามที่ว่างประจุขึ้น (Space-charge field) แบบเป็นคาบตามแถบการแทรกสอดของแสง เป็นสาเหตุให้ค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลางมีความแตกต่างกัน จากนั้นผลึกสามารถสร้างดัชนีเกรตติง (Index grating) ขึ้น เรียกว่าปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ (Photorefractive effect) ถ้ามุมตกกระทบของแสงเลเซอร์เหมาะสม เป็นไปตามเงื่อนไขการเลี้ยวเบนของแบรกก์ แสงจะเกิดการเลี้ยวเบนไปตกกระทบบนกระจกด้วยความเข้มแสงสูงที่สุดและสะท้อนกลับมาในแนวเดิมกับลำแสงตกกระทบ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์การเกิดคลื่นเฟสคอนจูเกตในผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์แบบทัศนศาสตร์ไม่เชิงเส้น โดยในการทดลองได้ทำการทดลองกับเรโซเนเตอร์หลายแบบ ซึ่งผลการทดลองพบว่า มีเรโซเนเตอร์ 2 ชนิดที่สามารถทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงได้ โดยในการทดลองได้ทำการปรับมุมตกกระทบของลำแสงเลเซอร์กับผลึก จนเกิดเป็นปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงและได้ลำแสงจากคลื่นเฟสคอนจูเกตที่มีความเข้มแสงมากที่สุด โดยในแต่ละแบบได้ทำการทดลอง 3 ครั้ง เพื่อหามุมตกกระทบเฉลี่ยของลำแสง ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2

จากตารางที่ 4.1 แสดงมุมตกกระทบของลำแสงเพื่อศึกษาลำแสงเลี้ยวเบนจากปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงจากเรโซเนเตอร์แบบที่ 1 โดยจัดการชุดทดลองดังรูปที่ 3.5 ในผลึกแบเรียมไททานเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม โดยใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออนเป็นแหล่งกำเนิดแสงสีแดงความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ได้ผลการทดลองดังตาราง 4.1(ก), 4.1(ข), 4.1(ค) และ 4.1(ง) ซึ่งสามารถสังเกตลำแสงที่ตกกระทบบนฉากโดยมีกำลังทางแสงสูงสุดที่มุมตกกระทบเฉลี่ยเท่ากับ 37.23 องศา

จากนั้นในตารางที่ 4.2 ได้ทำการทดลองเหมือนเดิมแต่เปลี่ยนชนิดของเรโซเนเตอร์เป็นแบบที่ 2 โดยจัดการชุดทดลองดังรูปที่ 3.6 เพื่อศึกษาลำแสงเลี้ยวเบนจากปรากฏการณ์การเฟสคอนจูเกชันเชิงแสง ได้ผลการทดลองดังตาราง 4.2(ก), 4.2(ข), 4.2(ค) และ 4.2(ง) ซึ่งสามารถสังเกตลำแสงที่ตกกระทบบนฉากโดยมีกำลังทางแสงสูงสุดที่มุมตกกระทบเฉลี่ยเท่ากับ 37.44 องศา

ตารางที่ 4.1(ก) แสดงมุมตกกระทบของลำแสงโดยใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 1 การทดลองครั้งที่ 1

θ_i (degree)	P_0 (mW)	P_1 (mW)	P_2 (mW)	P_{o1} (μ W)	P_{o2} (μ W)	PC Output (μ W)	PC Reflectivity $\times 10^{-3}$
23.95	14.56	8.74	3.98	4.11	4.12	0.01	0.114
24.34	14.52	8.71	4.04	3.98	4.00	0.02	0.230
25.88	14.53	8.72	3.46	3.77	3.79	0.02	0.229
26.31	14.48	8.69	4.01	4.01	4.04	0.03	0.345

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

27.45	14.62	8.77	3.58	4.26	4.31	0.05	0.570
28.25	14.51	8.71	4.03	3.45	3.52	0.07	0.804
29.61	14.55	8.73	4.15	4.02	4.11	0.09	1.031
30.39	14.61	8.77	4.11	3.66	3.79	0.13	1.483
31.13	14.48	8.69	4.14	3.86	4.01	0.15	1.727
32.94	14.52	8.71	3.96	4.01	4.18	0.17	1.951
33.29	14.53	8.72	3.95	4.03	4.22	0.19	2.179
34.77	14.53	8.72	3.83	3.99	4.25	0.26	2.982
35.31	14.44	8.66	3.84	4.03	4.31	0.28	3.232
36.82	14.65	8.79	4.12	4.07	4.39	0.32	3.641
37.11	14.49	8.69	3.84	4.06	4.52	0.46	5.291
38.48	14.55	8.73	4.27	4.02	4.44	0.42	4.811
39.34	14.42	8.65	4.13	4.18	4.53	0.35	4.045
40.72	14.54	8.72	4.13	3.96	4.28	0.32	3.668
41.35	14.57	8.74	3.96	3.83	4.05	0.22	2.517
42.56	14.60	8.76	3.51	4.14	4.33	0.19	2.169
43.86	14.53	8.72	3.84	4.07	4.22	0.15	1.721
44.39	14.58	8.75	3.77	3.72	3.85	0.13	1.486
45.13	14.52	8.71	4.05	4.22	4.35	0.13	1.492

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

46.29	14.52	8.71	4.03	3.92	4.02	0.10	1.148
47.31	14.55	8.73	4.11	4.36	4.41	0.05	0.573
48.88	14.58	8.75	3.66	3.76	3.79	0.03	0.343
49.37	14.65	8.79	3.45	4.05	4.05	0.00	0.000
50.32	14.54	8.72	3.75	4.19	4.20	0.01	0.115

ตารางที่ 4.1(ข) แสดงมุมตกกระทบของลำแสงโดยใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 1 การทดลองครั้งที่ 2

θ_i (degree)	P_0 (mW)	P_1 (mW)	P_2 (mW)	P_{o1} (μ W)	P_{o2} (μ W)	PC Output (μ W)	PC Reflectivity $\times 10^{-3}$
23.69	14.55	8.73	4.16	4.08	4.08	0.00	0.000
24.77	14.49	8.69	3.46	3.86	3.88	0.02	0.230
25.48	14.52	8.71	3.47	3.75	3.77	0.02	0.229
26.91	14.51	8.71	4.12	4.00	4.05	0.05	0.574
27.86	14.55	8.73	4.06	4.27	4.31	0.04	0.458
28.11	14.56	8.74	4.11	3.39	3.47	0.08	0.916
29.91	14.58	8.75	3.97	4.04	4.14	0.10	1.143
30.13	14.58	8.75	4.23	3.61	3.72	0.11	1.257
31.91	14.56	8.74	4.23	3.82	3.98	0.16	1.832
32.32	14.50	8.70	4.07	4.03	4.22	0.19	2.184

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

33.84	14.64	8.78	3.99	4.12	4.30	0.18	2.049
34.69	14.52	8.71	4.15	3.95	4.19	0.24	2.755
35.08	14.57	8.74	4.13	4.01	4.33	0.32	3.660
36.18	14.53	8.72	4.02	4.02	4.35	0.33	3.785
37.44	14.58	8.75	4.14	4.10	4.58	0.48	5.487
38.37	14.57	8.74	4.18	4.11	4.55	0.44	5.033
39.77	14.51	8.71	3.97	4.23	4.59	0.36	4.135
40.24	14.65	8.79	4.06	3.94	4.27	0.33	3.754
41.67	14.53	8.72	4.06	3.79	3.99	0.20	2.294
42.63	14.58	8.75	3.62	4.21	4.39	0.18	2.058
43.55	14.51	8.71	3.95	4.01	4.14	0.13	1.493
44.77	14.55	8.73	4.01	3.77	3.91	0.14	1.604
45.90	14.58	8.75	3.89	4.29	4.39	0.10	1.143
46.96	14.48	8.69	3.79	3.88	4.01	0.13	1.496
47.86	14.49	8.69	3.96	4.34	4.38	0.04	0.460
48.44	14.61	8.77	3.53	3.73	3.77	0.04	0.456
49.31	14.57	8.74	3.77	4.02	4.04	0.02	0.229
50.44	14.49	8.69	3.92	4.21	4.23	0.02	0.230

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1(ค) แสดงมุมตกกระทบของลำแสงโดยใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 1 การทดลองครั้งที่ 3

θ_i (degree)	P_0 (mW)	P_1 (mW)	P_2 (mW)	P_{o1} (μ W)	P_{o2} (μ W)	PC Output (μ W)	PC Reflectivity $\times 10^{-3}$
23.72	14.53	8.72	4.05	4.03	4.04	0.01	0.115
24.39	14.61	8.77	3.42	3.95	3.96	0.01	0.114
25.25	14.57	8.74	3.95	3.73	3.74	0.01	0.114
26.29	14.58	8.75	4.00	4.03	4.06	0.03	0.343
27.44	14.58	8.75	3.74	4.19	4.25	0.06	0.686
28.90	14.48	8.69	3.75	3.38	3.45	0.07	0.806
29.88	14.54	8.72	4.08	4.07	4.15	0.08	0.917
30.88	14.53	8.72	3.42	3.58	3.70	0.12	1.376
31.32	14.55	8.73	4.05	3.79	3.96	0.17	1.947
32.55	14.59	8.75	4.02	4.11	4.30	0.19	2.170
33.39	14.59	8.75	4.03	3.99	4.18	0.19	2.170
34.88	14.60	8.76	4.06	4.01	4.26	0.25	2.854
35.48	14.53	8.72	3.89	4.08	4.38	0.30	3.441
36.77	14.54	8.72	4.07	4.04	4.37	0.33	3.783
37.15	14.62	8.77	4.09	4.09	4.56	0.47	5.358
38.23	14.56	8.74	4.09	4.13	4.59	0.46	5.266

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

39.25	14.59	8.75	4.05	4.13	4.46	0.33	3.770
40.66	14.51	8.71	3.99	3.88	4.18	0.30	3.446
41.83	14.49	8.69	3.88	3.86	4.07	0.21	2.415
42.04	14.54	8.72	3.85	4.16	4.32	0.16	1.834
43.12	14.59	8.75	3.61	4.10	4.23	0.13	1.485
44.96	14.59	8.75	3.96	3.68	3.81	0.13	1.485
45.94	14.56	8.74	4.02	4.26	4.38	0.12	1.374
46.34	14.59	8.75	3.64	3.96	4.07	0.11	1.257
47.67	14.56	8.74	3.85	4.27	4.31	0.04	0.458
48.08	14.55	8.73	3.81	3.81	3.84	0.03	0.344
49.11	14.56	8.74	3.88	4.10	4.11	0.01	0.114
50.86	14.52	8.71	3.62	4.18	4.18	0.00	0.000

ตารางที่ 4.1(ง) แสดงมุมตกกระทบของลำแสงโดยใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 1 ค่าเฉลี่ย

θ_i (degree)	P_0 (mW)	P_1 (mW)	P_2 (mW)	P_{01} (μ W)	P_{02} (μ W)	PC Output (μ W)	PC Reflectivity $\times 10^{-3}$
23.79	14.55	8.73	4.06	4.07	4.08	0.01	0.076
24.50	14.54	8.72	3.64	3.93	3.95	0.02	0.191
25.54	14.54	8.72	3.63	3.75	3.77	0.02	0.191

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

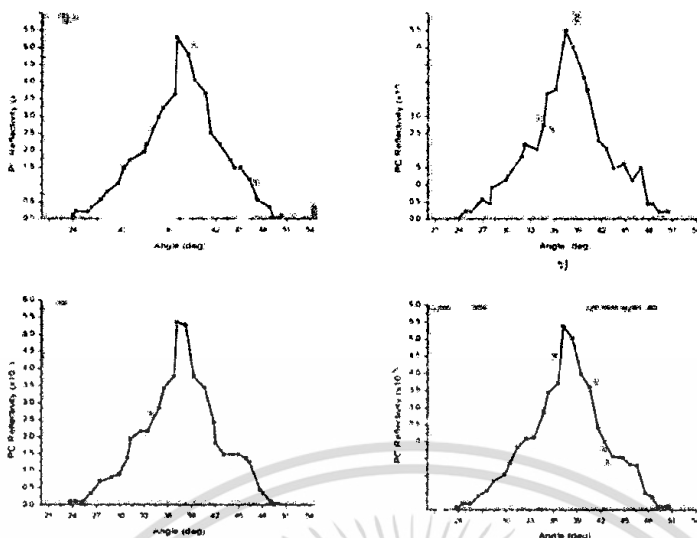
26.50	14.52	8.71	4.04	4.01	4.05	0.04	0.421
27.58	14.58	8.75	3.79	4.24	4.29	0.05	0.571
28.42	14.52	8.71	3.96	3.41	3.48	0.07	0.842
29.80	14.56	8.73	4.07	4.04	4.13	0.09	1.030
30.47	14.57	8.74	3.92	3.62	3.74	0.12	1.372
31.45	14.53	8.72	4.14	3.82	3.98	0.16	1.835
32.60	14.54	8.72	4.02	4.05	4.23	0.18	2.102
33.51	14.59	8.75	3.99	4.05	4.23	0.19	2.133
34.78	14.55	8.73	4.01	3.98	4.23	0.25	2.864
35.29	14.51	8.71	3.95	4.04	4.34	0.30	3.445
36.59	14.57	8.74	4.07	4.04	4.37	0.33	3.736
37.23	14.56	8.74	4.02	4.08	4.55	0.47	5.379
38.36	14.56	8.74	4.18	4.09	4.53	0.44	5.037
39.45	14.51	8.70	4.05	4.18	4.53	0.35	3.983
40.54	14.57	8.74	4.06	3.93	4.24	0.32	3.623
41.62	14.53	8.72	3.97	3.83	4.04	0.21	2.409
42.41	14.57	8.74	3.66	4.17	4.35	0.18	2.020
43.51	14.54	8.73	3.80	4.06	4.20	0.14	1.566
44.71	14.57	8.74	3.91	3.72	3.86	0.13	1.525

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

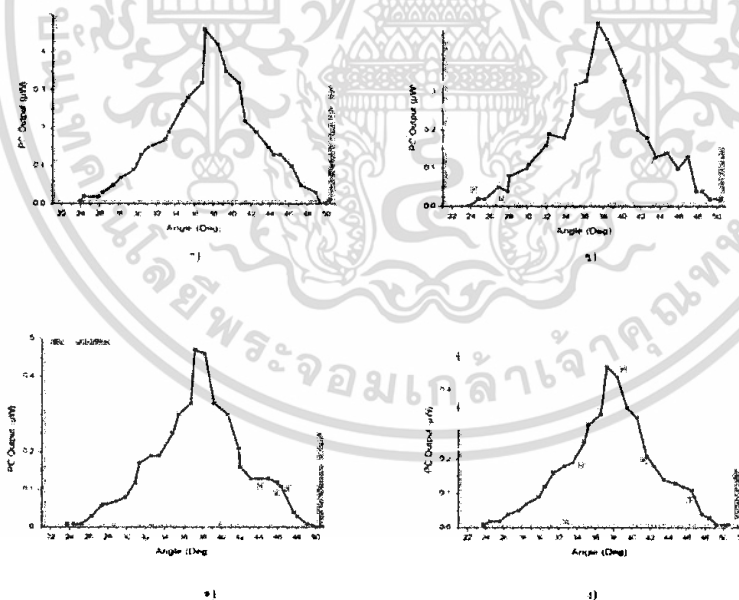
45.66	14.55	8.73	3.99	4.26	4.37	0.12	1.336
46.53	14.53	8.72	3.82	3.92	4.03	0.11	1.300
47.61	14.53	8.72	3.97	4.32	4.37	0.04	0.497
48.47	14.58	8.75	3.67	3.77	3.80	0.03	0.381
49.26	14.59	8.76	3.70	4.06	4.07	0.01	0.114
50.54	14.52	8.71	3.76	4.19	4.20	0.01	0.115

ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบกับค่า PC Reflectivity แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 จากกราฟจะเห็นว่าในการทดลองครั้งที่ 1, 2 และ 3 มุมตกกระทบที่สามารถเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงได้ดีที่สุดโดยมีค่า PC Reflectivity มากที่สุด คือที่มุม 37.11 องศา 37.44 องศา และ 37.15 องศา โดยมีค่าเท่ากับ 5.291×10^{-3} , 5.487×10^{-3} และ 5.358×10^{-3} ตามลำดับ โดยความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบกับค่า PC output แสดงได้ดังรูปที่ 4.3 โดยในการทดลองครั้งที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 0.46 μW , 0.48 μW และ 0.47 μW ตามลำดับ

จากการทดลองใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 1 โดยทำการทดลอง 3 ครั้ง ผลการทดลองที่ได้ในแต่ละครั้งมีความใกล้เคียงกันมาก โดยมุมตกกระทบที่สามารถเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงได้ดีและมีกำลังของแสงมากที่สุด คือ ที่มุมตกกระทบเฉลี่ย 37.23 องศา โดยมีค่า PC Reflectivity มากที่สุดเฉลี่ยเท่ากับ 5.379×10^{-3} และค่า PC output เฉลี่ยเท่ากับ 0.47 μW



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า PC Reflectivity กับมุมตกกระทบของลำแสงโดยใช้ เรโซเนเตอร์แบบที่ 1 จากรูป ก) , ข) , ค) และ ง) คือกราฟผลการทดลองจากตารางที่ 4.1(ก), 4.1(ข), 4.1(ค) และ 4.1(ง) ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า PC Output กับมุมตกกระทบของลำแสงโดยใช้ เรโซเนเตอร์แบบที่ 1 จากกราฟ ก) , ข) , ค) และ ง) คือกราฟผลการทดลองจากตารางที่ 4.1(ก), 4.1(ข), 4.1(ค) และ 4.1(ง) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2(ก) แสดงมุมตกกระทบของลำแสงโดยใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 2 การทดลองครั้งที่ 1

θ_i (degree)	P_0 (mW)	P_1 (mW)	P_2 (mW)	P_{o1} (mW)	P_{o2} (mW)	PC Output (mW)	PC Reflectivity
30.56	14.58	8.74	3.98	0.401	0.404	0.003	0.034
31.69	14.51	8.71	4.04	0.439	0.443	0.004	0.046
32.77	14.56	8.72	3.46	0.463	0.469	0.006	0.069
33.66	14.49	8.69	4.01	0.509	0.518	0.009	0.104
34.31	14.55	8.77	3.58	0.523	0.537	0.014	0.160
35.32	14.54	8.71	4.03	0.537	0.552	0.015	0.172
36.88	14.56	8.73	4.15	0.577	0.597	0.020	0.229
37.54	14.56	8.77	4.11	0.608	0.629	0.021	0.240
38.31	14.56	8.69	4.14	0.553	0.571	0.018	0.207
39.82	14.53	8.71	3.96	0.486	0.496	0.010	0.115
40.41	14.55	8.72	3.95	0.480	0.488	0.008	0.094

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2(ข) แสดงมุมตกกระทบของลำแสงโดยใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 2 การทดลองครั้งที่ 2

θ_i (degree)	P_0 (μW)	P_1 (μW)	P_2 (μW)	P_{o1} (μW)	P_{o2} (μW)	PC Output (μW)	PC Reflectivity
30.63	14.55	8.73	4.16	0.407	0.411	0.004	0.046
31.55	14.52	8.69	3.46	0.436	0.441	0.005	0.058
32.90	14.52	8.71	3.47	0.470	0.477	0.007	0.080
33.29	14.52	8.71	4.12	0.497	0.506	0.009	0.103
34.86	14.55	8.73	4.06	0.553	0.568	0.015	0.172
35.44	14.56	8.74	4.11	0.546	0.564	0.018	0.206
36.08	14.59	8.75	3.97	0.566	0.584	0.018	0.206
37.11	14.58	8.75	4.23	0.601	0.624	0.023	0.263
38.35	14.56	8.74	4.23	0.568	0.585	0.017	0.195
39.37	14.51	8.70	4.07	0.477	0.489	0.012	0.138
40.16	14.56	8.78	3.99	0.423	0.433	0.010	0.114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2(ค) แสดงมุมตกกระทบของลำแสงโดยใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 2 การทดลองครั้งที่ 3

θ_i (degree)	P_0 (mW)	P_1 (mW)	P_2 (mW)	P_{o1} (mW)	P_{o2} (mW)	PC Output (mW)	PC Reflectivity
30.89	14.56	8.72	4.05	0.412	0.415	0.003	0.034
31.67	14.57	8.77	3.42	0.441	0.446	0.005	0.057
32.31	14.57	8.74	3.95	0.458	0.464	0.006	0.069
33.49	14.56	8.75	4.00	0.501	0.511	0.010	0.114
34.55	14.58	8.75	3.74	0.547	0.559	0.012	0.137
35.86	14.49	8.69	3.75	0.551	0.568	0.017	0.196
36.92	14.55	8.72	4.08	0.581	0.601	0.020	0.229
37.66	14.53	8.72	3.42	0.613	0.632	0.019	0.218
38.29	14.55	8.73	4.05	0.550	0.569	0.019	0.218
39.55	14.58	8.75	4.02	0.481	0.496	0.015	0.171
40.69	14.57	8.75	4.03	0.462	0.471	0.009	0.103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2(ง) แสดงมตกกระทบของลำแสงโดยใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 2 ค่าเฉลี่ย

θ_i (degree)	P_0 (mW)	P_1 (mW)	P_2 (mW)	P_{o1} (mW)	P_{o2} (mW)	PC Output (mW)	PC Reflectivity
30.69	14.56	8.73	4.06	0.407	0.410	0.003	0.038
31.64	14.53	8.72	3.64	0.439	0.443	0.005	0.053
32.66	14.55	8.72	3.63	0.464	0.470	0.006	0.073
33.48	14.52	8.71	4.04	0.502	0.512	0.009	0.107
34.57	14.56	8.75	3.79	0.541	0.555	0.014	0.156
35.54	14.53	8.71	3.96	0.545	0.561	0.017	0.191
36.63	14.57	8.73	4.07	0.575	0.594	0.019	0.221
37.44	14.56	8.74	3.92	0.607	0.628	0.021	0.240
38.32	14.56	8.72	4.14	0.557	0.575	0.018	0.206
39.58	14.54	8.72	4.02	0.481	0.494	0.012	0.141
40.42	14.56	8.75	3.99	0.455	0.464	0.009	0.104

จากตารางที่ 4.1 และ 4.2

กำหนดให้ P_0 คือ กำลังทางแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน

P_1 คือ กำลังทางแสงที่ผ่านตัวแยกแสง ก่อนเข้าผลึก

P_2 คือ กำลังทางแสงที่ออกจากผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P_{01} คือ กำลังทางแสงที่สะท้อนกลับมา วัดขณะเริ่มต้นการทดลอง ณ มุมนั้นๆ

P_{02} คือ กำลังทางแสงที่สะท้อนกลับมาเป็นลำแสงจากปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสง วัดขณะที่ได้กำลังทางแสงสูงสุดสำหรับการทดลอง ณ มุมนั้นๆ

PC Output คือ กำลังทางแสงที่ได้จาก $PC\ Output = P_{02} - P_{01}$

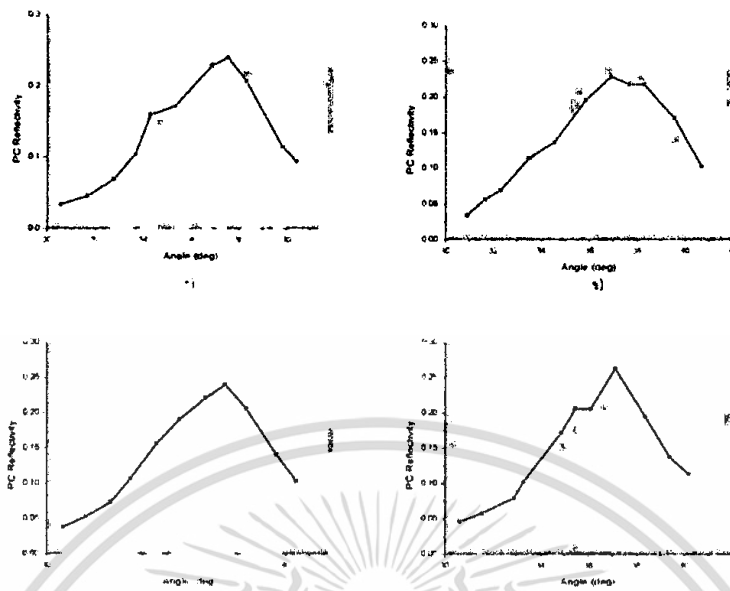
ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบกับค่า PC Reflectivity แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 จากกราฟจะเห็นว่าในการทดลองครั้งที่ 1, 2 และ 3 มุมตกกระทบที่สามารถเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงได้ดีที่สุดโดยมีค่า PC Reflectivity มากที่สุด คือที่มุม 37.54 องศา 37.11 องศา และ 37.66 องศา โดยมีค่าเท่ากับ 0.240, 0.263 และ 0.218 ตามลำดับ โดยความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบกับค่า PC output แสดงได้ดังรูปที่ 4.5 โดยในการทดลองครั้งที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 0.021 mW, 0.023 mW และ 0.019 mW ตามลำดับ

จากการทดลองใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 2 โดยทำการทดลอง 3 ครั้ง ผลการทดลองที่ได้ในแต่ละครั้งมีความใกล้เคียงกันมาก โดยมุมตกกระทบที่สามารถเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงได้ดีและมีกำลังของแสงมากที่สุด คือ ที่มุมตกกระทบเฉลี่ย 37.44 องศา โดยมีค่า PC Reflectivity มากที่สุดเฉลี่ยเท่ากับ 0.240 และค่า PC output เฉลี่ยเท่ากับ 0.021 mW

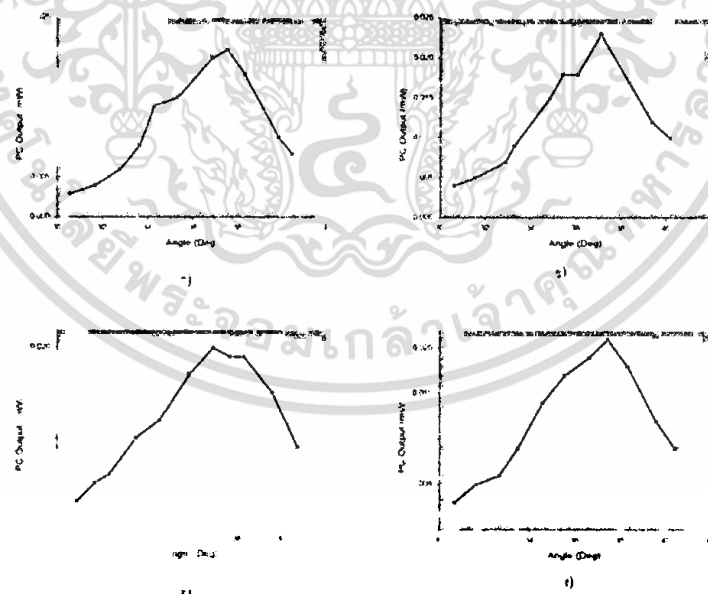
จากผลการทดลองจากตารางที่ 4.1 และ 4.2 จะเห็นว่ามุมตกกระทบที่ดีที่สุดของลำแสงในการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงสำหรับเรโซเนเตอร์ทั้งสองชนิด มีความแตกต่างกันเพียง 0.21 องศา แสดงว่ามุมตกกระทบในช่วงมุมเฉลี่ย 37 องศา เป็นมุมตกกระทบที่เหมาะสมต่อการเกิดปรากฏการณ์เพราะสามารถสร้างคลื่นเฟสคอนจูเกตได้กับทั้งเรโซเนเตอร์ทั้งสองชนิด แต่จากการทดลองจะเห็นว่าชนิดของเรโซเนเตอร์นั้นมีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงโดยจากการทดลองจะเห็นว่าเมื่อทดลองโดยใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 1 จะได้กำลังทางแสงจากลำแสงของคลื่นเฟสคอนจูเกตน้อยกว่าเมื่อทดลองกับเรโซเนเตอร์แบบที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบจากมุมที่ดีที่สุดในการเกิดปรากฏการณ์ของเรโซเนเตอร์ทั้งสองชนิด

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อทดลองด้วยเรโซเนเตอร์ต่างชนิดกัน เรโซเนเตอร์แบบที่ 1 จะทำให้เกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงโดยมีกำลังทางแสงน้อยกว่าเรโซเนเตอร์แบบที่ 2 เนื่องจากเรโซเนเตอร์ชนิดที่ 1 นั้นเมื่อมีแสงตกกระทบผลึก แสงบางส่วนจะมีการกระเจิง ทำให้แสงที่เหลือสำหรับใช้ในการเกิดปรากฏการณ์ลดลงสำหรับเรโซเนเตอร์ชนิดที่ 2 เนื่องจากการใส่กระจกเข้าไปตรงด้านหลังของผลึก กระจกจะช่วยสะท้อนลำแสงให้กลับเข้ามาในผลึกทำให้มีปริมาณของแสงเพิ่มมากขึ้นสำหรับการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ PC Reflectivity กับมุมตกกระทบของลำแสง โดยใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 2 จากกราฟ ก) ข) ค) และ ง) คือกราฟผลการทดลองจากตารางที่ 4.2 (ก), 4.2 (ข), 4.2(ค) และ 4.2(ง) ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า PC Output กับมุมตกกระทบของลำแสงโดยใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 2 จากกราฟ ก) , ข), ค) และ ง) คือกราฟผลการทดลองจากตารางที่ 4.2 (ก), 4.2(ข), 4.1(ค) และ 4.2(ง) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงเวลาในการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงที่มุมเฉลี่ย 37.23 องศา จาก

เรโซเนเตอร์ ชนิดที่ 1

เวลา (นาทีก)	P_{o2} /ครั้งที่1 (μW)	P_{o2} /ครั้งที่2 (μW)	P_{o2} /ครั้งที่3 (μW)	P_{o2} /เฉลี่ย (μW)	PC Output (μW)	PC Reflectivity $\times 10^{-3}$
0	0	0	0	0	0.003	0.038
1	0.02	0.03	0.03	0.027	0.030	0.343
2	0.09	0.07	0.04	0.067	0.070	0.801
3	0.19	0.17	0.17	0.177	0.180	2.059
4	0.24	0.22	0.25	0.237	0.240	2.746
5	0.25	0.23	0.26	0.247	0.250	2.860
6	0.26	0.24	0.27	0.257	0.260	2.975
7	0.29	0.27	0.28	0.280	0.283	3.242
8	0.30	0.28	0.30	0.293	0.297	3.394
9	0.31	0.29	0.31	0.303	0.307	3.509
10	0.34	0.31	0.32	0.323	0.327	3.738
11	0.36	0.35	0.35	0.353	0.357	4.081
12	0.38	0.38	0.38	0.380	0.383	4.386
13	0.40	0.37	0.39	0.387	0.390	4.462

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14	0.41	0.39	0.39	0.397	0.400	4.577
15	0.42	0.39	0.41	0.407	0.410	4.691
16	0.45	0.40	0.41	0.420	0.423	4.844
17	0.46	0.48	0.47	0.470	0.473	5.416
18	0.45	0.47	0.47	0.463	0.467	5.339
19	0.46	0.48	0.46	0.4	0.470	5.378
20	0.46	0.48	0.47	0.470	0.473	5.416
21	0.46	0.48	0.47	0.470	0.473	5.416
22	0.45	0.48	0.47	0.467	0.470	5.378
23	0.46	0.48	0.46	0.467	0.470	5.378
24	0.46	0.47	0.47	0.467	0.470	5.378
25	0.46	0.48	0.47	0.470	0.473	5.416
26	0.45	0.48	0.47	0.467	0.470	5.378
27	0.46	0.48	0.46	0.467	0.470	5.378
28	0.46	0.47	0.47	0.467	0.470	5.378
29	0.45	0.48	0.47	0.467	0.470	5.378
30	0.46	0.48	0.47	0.470	0.473	5.416

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงเวลาในการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูชันเชิงแสง ที่มุมเฉลี่ย 37.44 องศา

จากเรโซเนเตอร์ชนิดที่ 2

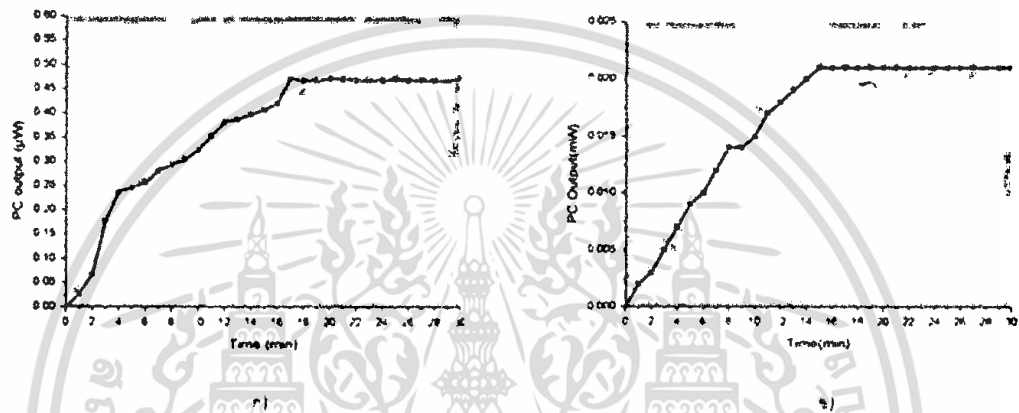
เวลา (นาท)	P_{o2} /ครั้งที่1 (mW)	P_{o2} /ครั้งที่2 (mW)	P_{o2} /ครั้งที่3 (mW)	P_{o2} /เฉลี่ย (mW)	PC Output (mW)	PC Reflectivity
0	0	0	0	0	0.000	0.004
1	0.001	0.002	0	0.001	0.001	0.015
2	0.003	0.005	0.002	0.003	0.004	0.042
3	0.005	0.006	0.004	0.005	0.005	0.061
4	0.007	0.007	0.006	0.007	0.007	0.080
5	0.010	0.010	0.008	0.009	0.010	0.111
6	0.010	0.011	0.009	0.010	0.010	0.118
7	0.013	0.013	0.011	0.012	0.013	0.145
8	0.015	0.014	0.012	0.014	0.014	0.160
9	0.016	0.015	0.012	0.014	0.015	0.168
10	0.016	0.017	0.013	0.015	0.016	0.179
11	0.017	0.018	0.015	0.017	0.017	0.195
12	0.018	0.020	0.017	0.018	0.019	0.214
13	0.018	0.022	0.018	0.019	0.020	0.225

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

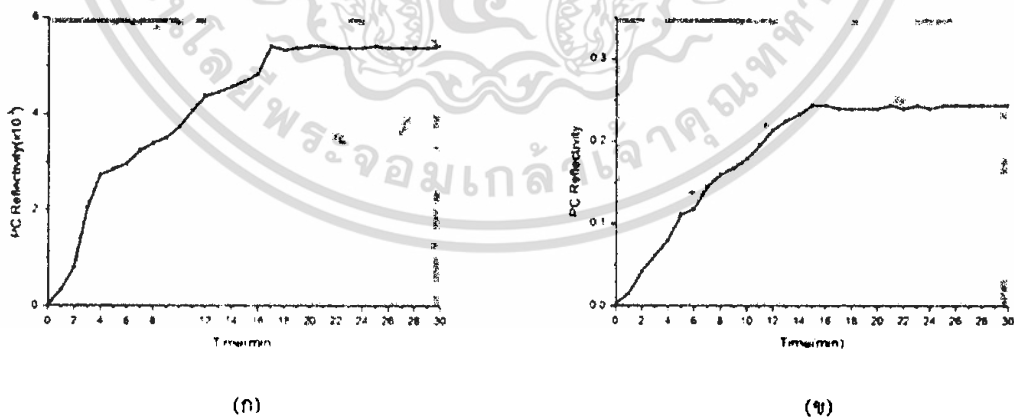
14	0.020	0.022	0.018	0.020	0.020	0.233
15	0.021	0.023	0.019	0.021	0.021	0.244
16	0.021	0.023	0.019	0.021	0.021	0.244
17	0.020	0.023	0.019	0.021	0.021	0.240
18	0.021	0.022	0.019	0.021	0.021	0.240
19	0.020	0.023	0.019	0.021	0.021	0.240
20	0.021	0.023	0.018	0.021	0.021	0.240
21	0.021	0.023	0.019	0.021	0.021	0.244
22	0.021	0.023	0.018	0.021	0.021	0.240
23	0.021	0.023	0.019	0.021	0.021	0.244
24	0.020	0.023	0.019	0.021	0.021	0.240
25	0.021	0.023	0.019	0.021	0.021	0.244
26	0.021	0.023	0.019	0.021	0.021	0.244
27	0.021	0.023	0.019	0.021	0.021	0.244
28	0.021	0.023	0.019	0.021	0.021	0.244
29	0.021	0.023	0.019	0.021	0.021	0.244
30	0.021	0.023	0.019	0.021	0.021	0.244

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองจากตารางที่ 4.3 และ 4.4 ทำการจับเวลาเพื่อเปรียบเทียบเวลาในการเกิดปรากฏการณ์จากเรโซเนเตอร์ทั้งสองชนิดโดยทดลองกับมุมที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่ดีที่สุดและมีกำลังทางแสงมากที่สุด ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับค่า PC Output แสดงได้ดังรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าเวลาในการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูกันเชิงแสงของเรโซเนเตอร์ชนิดที่ 1 จะใช้เวลาในการเกิดปรากฏการณ์จนมีกำลังทางแสงมากที่สุดนั้นนานกว่าเรโซเนเตอร์ชนิดที่ 2 คือ 17 นาที และ 15 นาที ตามลำดับ และจากกราฟ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบกับค่า PC Reflectivity ที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเกิดปรากฏการณ์กับค่า PC Output ก) จากเรโซเนเตอร์ชนิดที่ 1 และ ข) จากเรโซเนเตอร์ชนิดที่ 2



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเกิดปรากฏการณ์กับค่า PC Reflectivity

ก) จากเรโซเนเตอร์ชนิดที่ 1 และ ข) จากเรโซเนเตอร์ชนิดที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ภาพลำแสงของปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสง

ภาพของลำแสงสะท้อนจากปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงสามารถสังเกตได้บนฉากรับแสง ที่วางอยู่ตรงด้านข้างของ beam splitter และบันทึกภาพโดยใช้กล้อง CCD ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งเป็นภาพแสดงลำแสงสะท้อนจากปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงจากการทดลองโดยใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 1 และรูปที่ 4.9 จากเรโซเนเตอร์แบบที่ 2 โดยเป็นภาพที่บันทึกจากการทดลองครั้งที่ 1, 2 และ 3 จากมุมที่เกิดปรากฏการณ์ที่ดีที่สุดและมีกำลังทางแสงมากที่สุด

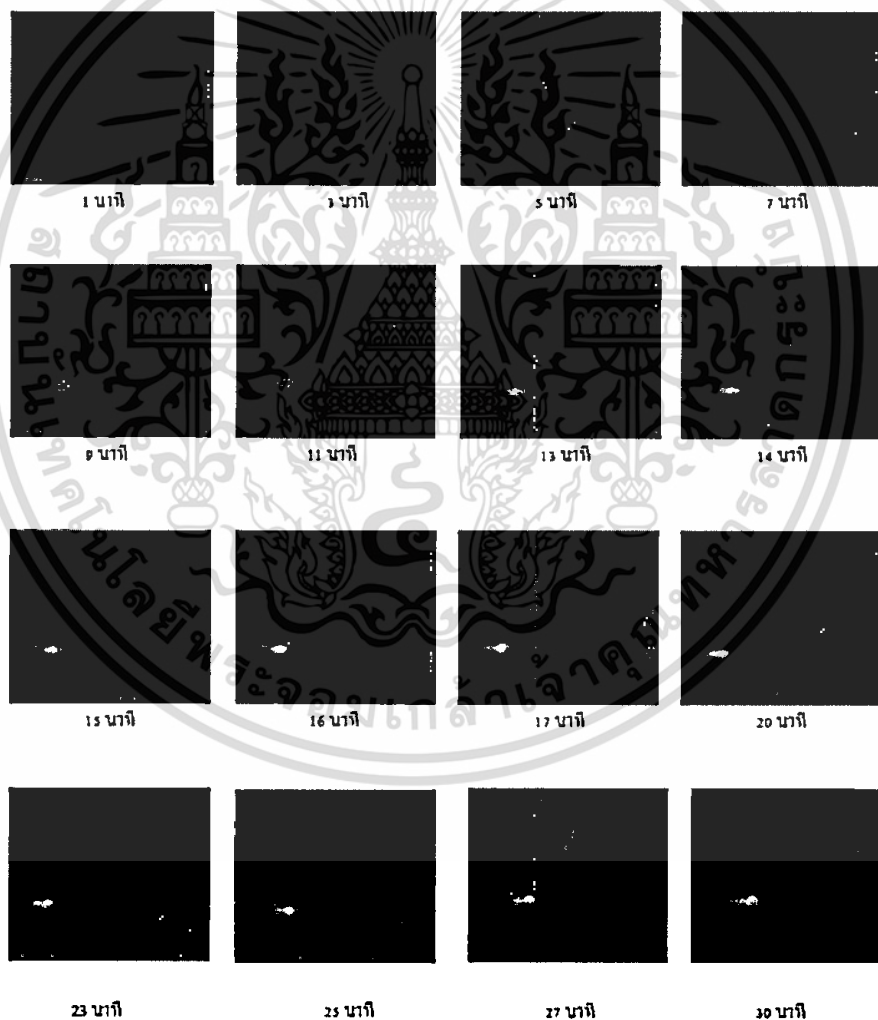


รูปที่ 4.8 แสดงลำแสงจากปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงโดยเรโซเนเตอร์แบบที่ 1 จากตารางที่ 4.1 (ก), 4.1(ข) และ 4.1(ค) จากมุมที่เกิดปรากฏการณ์ที่ดีที่สุดและมีกำลังทางแสงมากที่สุด ก) ที่มุม 37.11 องศา ข) ที่มุม 37.44 องศา ค) ที่มุม 37.15 องศา วัดกำลังทางแสงที่ออกมาได้ 0.46 nW, 0.48 nW และ 0.47 nW ตามลำดับ



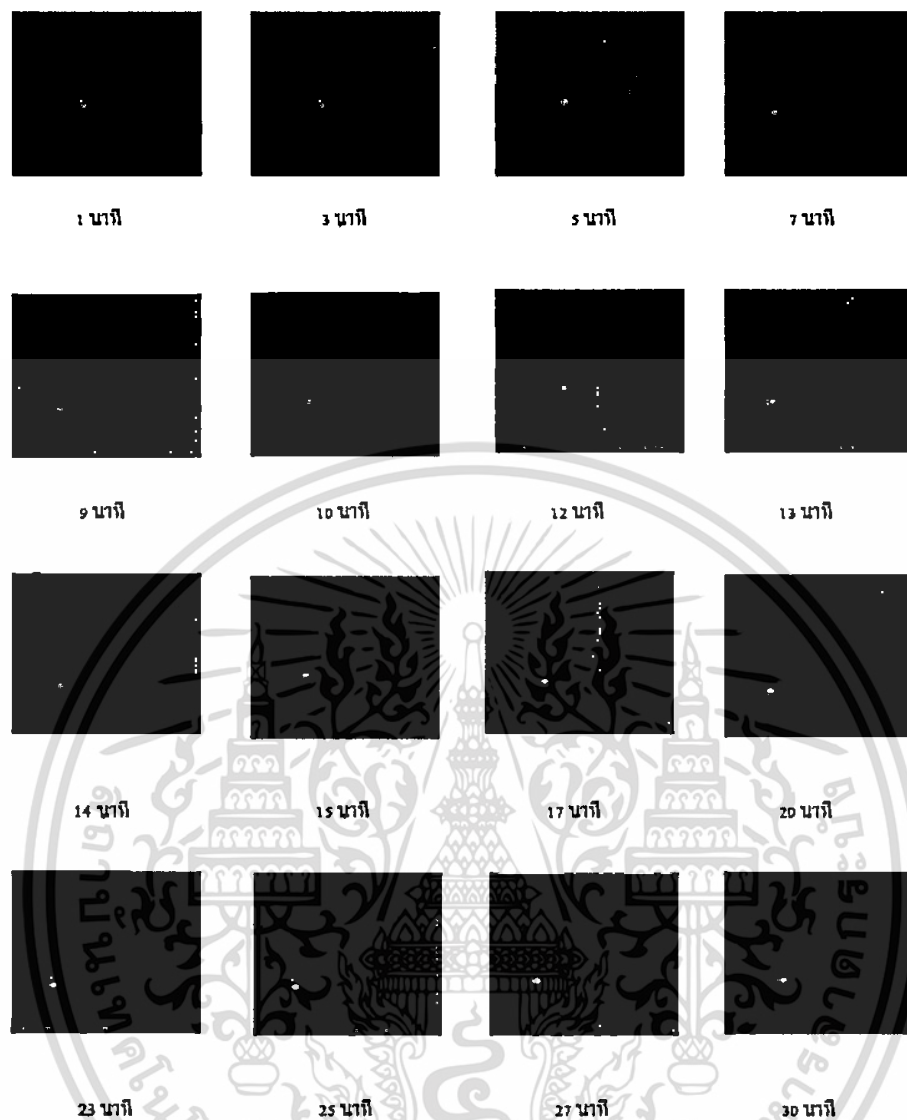
รูปที่ 4.9 แสดงลำแสงจากปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงโดยเรโซเนเตอร์แบบที่ 2 จากตารางที่ 4.2 (ก), 4.2 (ข) และ 4.2(ค) จากมุมที่เกิดปรากฏการณ์ที่ดีที่สุดและมีกำลังทางแสงมากที่สุด ก) ที่มุม 37.54 องศา ข) ที่มุม 37.11 องศา ค) ที่มุม 37.66 องศา วัดกำลังทางแสงที่ออกมาได้ 0.021 μ W, 0.023 μ W และ 0.019 μ W ตามลำดับ

เมื่อมีเมื่อแสงตกกระทบผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม แสงจะกระเจิงภายในผลึก และแทรกสอดกันเกิดเป็นแถบมืดแถบสว่าง ทำให้อะตอมภายในผลึกเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ตามแถบการแทรกสอดที่เกิดขึ้น จากนั้นเกิดสนามไฟฟ้าที่ว่างประจุขึ้น และเกิดการสร้างเกรตติงขึ้นภายในผลึกตามทิศของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เปรียบเสมือนสลิตช่องเล็ก ๆ ทำให้ค่าดัชนีหักเหภายในผลึกแต่ละแกนเปลี่ยนแปลง เมื่อแสงตกกระทบจะส่งผ่านพลังงานซึ่งกันและกัน จะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของแสงผ่านช่องสลิตเล็ก ๆ ของเกรตติงที่ถูกสร้างขึ้น ถ้ามุมตกกระทบของแสงเลเซอร์เหมาะสมเป็นไปตามเงื่อนไขการเลี้ยวเบนของแบรกก์ แสงจะเกิดการสะท้อนกลับในแนวเดียวกับลำแสงตกกระทบด้วยความเข้มแสงมากที่สุดซึ่งเป็นปรากฏการณ์การเฟสคอนจูกันเชิงแสงในผลึกโพโตรีเฟอริกทีฟ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์แบบทัศนศาสตร์ไม่เชิงเส้น



รูปที่ 4.10 แสดงลำแสงจากปรากฏการณ์เฟสคอนจูกันเชิงแสงโดยเรโซเนเตอร์แบบที่ 1 จากตารางที่ 4.3 ที่มีมอดูลี 37.23 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แสดงลำแสงจากปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงโดยเรโซเนเตอร์ชนิดที่ 2 จากตารางที่ 4.4 ที่มุมเฉลี่ย 37.44 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากงานวิจัยที่ผ่านมาในการทดลองเพื่อศึกษาการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงด้วยเลเซอร์สีเขียว ทำการทดลองกับผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดที่ไม่ได้เติมอะตอมของสารเจือพบว่าในการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงเป็นไปได้ยาก จึงมีการทดลองเจืออะตอมสารเจือหลายชนิดลงในสารประกอบ BaTiO_3 ซึ่งสารเจือที่ได้รับความนิยมมาก คือ ซีเรียม (Ce) โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียมขนาด $6.15 \text{ mm} \times 5.20 \text{ mm} \times 8.20 \text{ mm}$

มาใช้ในการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงด้วยเลเซอร์อาร์กอน ความยาวคลื่น 514.5 nm แสงสีเขียว ผลการทดลองพบว่าสามารถเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงได้เร็วและดี โดยใช้เวลาในการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงจนมีความเข้มแสงมากที่สุดเพียง 250 วินาทีและมีค่า PC Reflectivity มากที่สุดเท่ากับ 1.25% เนื่องจากระดับพลังงานของซีเรียมในแถบพลังงานในผลึกแบเรียมไททาเนตนั้นเหมาะสมกับความยาวคลื่นของแสงสีเขียวจึงทำให้เกิดปรากฏการณ์ได้ในเวลารวดเร็วและเห็นปรากฏการณ์ได้อย่างชัดเจน แต่สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงในผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียมโดยเลเซอร์ที่ใช้คือเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน แสงสีแดงความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ผลการทดลองที่ได้นั้นพบว่าสามารถเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชันเชิงแสงได้เช่นเดียวกัน แต่เกิดปรากฏการณ์ค่อนข้างยาก ใช้เวลาในการเกิดปรากฏการณ์นาน เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ทดลองด้วยแสงสีเขียว แต่ที่ยังสามารถเกิดปรากฏการณ์ได้นั้นไม่ได้หมายความว่าระดับพลังงานของซีเรียมจะพอดีกับแสงสีเขียวหรือเหมาะสมกับแสงสีเขียวเท่านั้น โดยระดับพลังงานของซีเรียมนั้นอาจจะเหมาะสมกับทั้งแสงสีเขียวและแสงสีแดง แต่ถ้าเปรียบเทียบในแง่ของความน่าจะเป็นของการเกิดปรากฏการณ์ แสงสีเขียวน่าจะมีโอกาสที่จะทำให้ให้อิเล็กตรอนสามารถถูกกระตุ้นขึ้นไปบนแถบนำกระแสได้มากกว่าแสงสีแดง

โดยการเติมสารเจือของซีเรียมเข้าไปนั้นช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์อิเล็กโตรออปติกส์ อัตราการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้น การคับปลิงแสงมากขึ้น และการเหนี่ยวนำแสงเข้าใกล้ความเป็นเชิงเส้นมากขึ้น โดยสารเจือแต่ละชนิดที่เติมลงในผลึก จะมีลักษณะของแถบพลังงานที่แตกต่างกัน ผลึกแบเรียมไททาเนตที่ไม่ได้เจือด้วยอะตอมของสารเจือมีช่องว่างพลังงานหรือ $E_g = 3.2 \text{ eV}$ โดยสารเจือซีเรียมที่เติมลงไปนั้น เรียกว่า สารเจือผู้ให้ (donor impurity) ทุกๆสารเจือที่เติมเข้าไปจะให้อิเล็กตรอนอิสระหนึ่งตัว ทำให้เกิดระดับพลังงานในช่องว่างของแถบพลังงาน โดยระดับพลังงานของผู้ให้ อยู่เหนือแถบวาเลนซ์ประมาณ 2.4 eV สารเจือซีเรียมนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถแตกตัวเป็นไอออนได้เนื่องจากการดูดกลืนโฟตอนจากแสงที่ตกกระทบตัวกลางและการแตกตัวเป็นไอออนทำให้อิเล็กตรอนสามารถถูกกระตุ้นขึ้นไปบนแถบนำกระแสได้ง่ายกว่าในกรณีที่ไม่ได้เติมอะตอมของสารเจือซีเรียมในผลึก BaTiO_3 ;

ดังนั้นจึงต้องเติมสารเจือซึ่งใช้พลังงานในการกระตุ้นต่ำ ๆ เพื่อขยายช่วงการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงที่กว้างขึ้น จึงมีการทดลองเจืออะตอมสารเจือหลายชนิดลงในสารประกอบ BaTiO_3 เช่น Fe, Co, Ce, และ Rh ถึงแม้ผลึก BaTiO_3 ชนิดเจือด้วย Fe ไม่มีความสำคัญต่อการพัฒนาประสิทธิภาพของผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟ แต่สามารถเพิ่มความเป็นวัสดุโฟโตรีแฟรกทีฟของผลึก BaTiO_3 ได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Ashkin, G. D. Boyd, J. M. Dziedzic, R. G. Smith, A. A. Ballman, J. J. Levinstein, and K. Nassau, 1966. "Optically Induced Refractive Index Inhomogeneities in LiNbO_3 and LiTaO_3 ," *Appl. Phys. Lett.* 9, 72-74
- [2] Sze-Keung Kwong, Amnon Yariv, Mark Cronin-Golomb, and Baruch Fischer, 1986. "Phase of phase conjugation and its effect in the double phase-conjugate resonator," *J. Opt. Soc. Am. A* 3, 157-160
- [3] X. Wang, R. Magnusson, and A. Haji-Sheikh, 1993. "Real-time interferometry with photorefractive reference holograms," *Appl. Opt.* 32, 1983-1986
- [4] San-Ching De La Cruz, Stuart MacCormack, Jack Feinberg, Q. Byron He, Hua-Kuang Liu, and Pochi Yeh, 1995. "Effect of beam coherence on mutually pumped phase conjugators," *J. Opt. Soc. Am. B* 12, 1363-1369
- [5] Pochi Yeh, 1993. [Introduction to photorefractive nonlinear optics], Wiley Interscience, New York,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แบบรายงานการใช้จ่ายเงินโครงการวิจัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 4 รอบ 12 เดือน ประจำปีงบประมาณ 2557.

แหล่งงบประมาณแผ่นดิน (แบบปกติ) แหล่งเงินรายได้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) เฟสคอนจูเกตของ เซอร์มิอิมิตีแอสเซมบลีที่ความถี่คลื่น 632.8 นาโนเมตร

(ภาษาอังกฤษ) Optical Phase Conjugate from cerium doped barium titanate at wavelength...632.8 nm

ชื่อ-สกุลหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน/ผู้วิจัย อ.จรรยาวัฒน์ แต่งตั้ง

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ ตุลาคม 2556 ถึงวันที่ กันยายน 2557.

ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี เดือน ตั้งแต่วันที่ ตุลาคม 2556 ถึงวันที่ กันยายน 2557

ข้อมูลการรายงานค่าใช้จ่ายงบประมาณโครงการวิจัย

1. การเบิกจ่ายงบประมาณ (กรณีการจ่ายเงินถ้าจ่ายงวดเดียวให้ลบข้อที่ไม่เกี่ยวข้องออก)
2. งวดที่ 1 50,000 บาท 100 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ต/ว)
- 3.
2. สรุปงบประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้นับตั้งแต่เริ่มทำการวิจัยถึงปัจจุบัน (จำแนกตามหมวดค่าใช้จ่าย)

หมวดค่าใช้จ่าย	งบประมาณรวมทั้งโครงการ	ค่าใช้จ่าย (บาท)	คงเหลือ (หรือเกิน)
งบบุคลากรค่าจ้างชั่วคราว		5,000	
งบดำเนินงาน			
ค่าตอบแทน			
ค่าใช้จ่ายสอย	3,000	3,000	0
ค่าวัสดุ	42,000	42,000	0
ค่าสาธารณูปโภค			
งบลงทุน: ค่าครุภัณฑ์			
รวม	50,000	50,000	50,000

.....

(.....)

ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

...../...../.....

.....

(.....)

ลงนามเจ้าหน้าที่การเงิน/เจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง

...../...../.....

หมายเหตุ : นักวิจัยหรือเจ้าหน้าที่การเงินสามารถปรับหรือเปลี่ยนแปลงเพิ่มเติมข้อความได้ตามความเหมาะสมและสอดคล้องกับการ

ดำเนินงาน อาทิเช่น นักวิจัยอยู่ระหว่างการดำเนินการเคลียร์ด้านเอกสารทางการเงิน หรือข้อความอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Name : Mr Thammarat Taenglang

Date of birth : 8th April 1968

Height : 1.67 m / Weight : 70 kg

Status : Married

Study degree :



1992 : BSc., GPA = 2.57 in Physics from Ramkhamheang university, Bangkok

2001: ME., GPA = 3.70 in Electrical Engineering from KMITL, Bangkok

Conference

1. "The mean-shift imaging using 2D-histogram segmentation," International Conference on Mathematical

Modelling and Computaion on Universiti Brunei Darussalam, june 2006.

2. "Molecular Transporters Generations Based on Ant Colony Algorithm for Molecular and Storage

Applications," Piers Conference, 2010.

3. "A Stirling Engine Manipulation using Laser Combustion Technique," Joint international Conference on

JICTEE 2010.

4. "The Pulse Jet Engine Array Manipulation," Joint international Conference on JICTEE 2010.

5. "The Pulse Jet Engine Array Manipulation," International Conference on Modeling and Simulation

Technology, Tokai University Takanawa Campus, Tokyo, Japan, 2011.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Journal

1. "Molecular network based on ant colony system via wavelength routers," Microwave And Optical

Technology Letters, 2010.

2. " Error corrections of quantum key distribution of the quantum codes via optical wireless link," Optik -

International Journal for Light and Electron Optics, 2011.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้