#### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสง (Optical phase conjugation :OPC) เป็นเทคนิคที่มีการพัฒนามาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 ซึ่งเทคนิคนี้เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานหลายๆด้าน โดยการศึกษาเกี่ยวกับเฟสคอนจุ เกชั่นเชิงแสงนั้นถือว่าเป็นงานวิจัยหนึ่งที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากทางด้านทัศนศาสตร์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear optics) และทางด้านควอนตัมอิเล็กทรอนิกส์

เมื่อเริ่มมีนักวิจัยสนใจ การทดลองเพื่อเปรียบเทียบความเข้มของลำแสงกับสนามไฟฟ้าภายในอะตอม และการกระจายตัวของอิเล็กตรอนภายในตัวกลาง ซึ่งถูกกระตุ้นจากการแผ่รังสีของลำแสง และจากการหักเห และการเลี้ยวเบนของแสงที่ตำแหน่งผิวหน้าและเดินทางผ่านเข้าไปในตัวกลาง ส่งผลให้ดัชนีหักเหแสงใน ้ตัวกลางแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความเข้มของลำแสงตกกระทบ ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear optics) [1] และเกิดขึ้นในตัวกลางแบบอิเล็กโทรออฟติกส์ (Electro optic) โดยในตัวกลางแบบนี้ สามารถเกิดปรากฏการณ์หนึ่งที่น่าสนใจ คือปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ (Photorefractive effect : PR) [1] ซึ่งปรากฏการณ์นี้ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์อื่น ๆ อีก เช่น ปรากฏการณ์การผสมคลื่น 2 ขบวน (Two-wave mixing) ปรากฏการณ์การผสมคลื่น 4 ขบวน (Four-wave mixing) ปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนด้วยตัวเอง แบบแอนไอโซโทรปิก (Anisotropic self-diffraction : ASD) [2] และปรากฏการณ์คลื่นเฟสคอนจุเกต (Phase conjugate wave) ซึ่งได้รับความสนใจในการศึกษาและทดลองของนักวิจัยเป็นอย่างมาก โดย ้ลักษณะหนึ่งที่สำคัญของปรากฏการณ์การคลื่นเฟสคอนจุเกต คือการย้อนกลับได้ของลำแสงในผลึกโฟโตรีแฟ รกทีฟ เรียกตัวกลางหรือผลึกประเภทนี้ว่าตัวกลางโฟโตรีแฟรกทีฟ (Photorefractive medium) หรืออาจ เรียกว่าตัวกลางทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear optic medium) ซึ่งในระดับพื้นฐานทัศนศาสตร์แบบ ไม่เชิงเส้นจะศึกษาเกี่ยวกับอันตรกิริยาของลำแสงภายในวัสดุ การที่เรียกทัศนศาสตร์ไม่เชิงเส้นเพราะว่า วัสดุมี ้ความสามารถในการตอบสนองต่อแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าอย่างไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งการเดินทางของลำแสงใน ้วัสดุตัวกลางอธิบายโดยใช้ค่าดัชนีหักเหแสง ถ้าสามารถควบคุมการเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลางได้จาก การส่องสว่างของลำแสง ดังนั้นจะสามารถควบคุมการเดินทางของลำแสงได้โดยใช้ลำแสงอีกลำหนึ่ง นำไปสู่ การสร้างนวัตกรรมเทคโนโลยีใหม่ ๆ อีกมากมายบนพื้นฐานของการควบคุมแสงโดยใช้แสงลำเดียวจากลำแสง ตกกระทบ

การทดลองในปี ค.ศ. 1972 พบว่าหน้าคลื่นของรังสีที่ถูกกระเจิงกลับจากการถูกกระตุ้นด้วยการ กระเจิงของบริลลูอิน (Stimulated Brillouin scattering : SBS) เป็นแบบจำลองเวลาผันกลับของลำแสงที่ กระตุ้นจากลำแสงตกกระทบ โดยยิงรังสีจากเลเซอร์ทับทิมแบบพัลล์เดี่ยวเข้าไปในเซลล์ SBS เมื่อตรวจสอบ รังสีและหน้าคลื่นที่กระเจิงกลับ พบว่ารังสีนั้นมีลักษณะเหมือนกับรังสีตกกระทบ จากการทดลองพบว่าคลื่น เฟสคอนจูเกตใน SBS มีอัตราความเข้มแสงเป็นสองเท่าของคลื่นที่มีเฟสไม่ตรงกัน ดังนั้นสัมประสิทธิ์ความเข้ม แสงแบบเอ็กโพเนนเซียลเป็นความแตกต่างอย่างมากกับความเข้มแสงของคลื่นแสงเหล่านั้น และไม่กี่ปีต่อมา ผลการการทดลองข้างต้นถูกนำเสนอและแสดงให้เห็นว่าปรากฏการณ์การผสมคลื่นแสง 4 ขบวน (Optical four-wave mixing :FWM) [1] สามารถสร้างคลื่นเฟสคอนจูเกตได้ โดย FWM ในทัศนศาสตร์ตัวกลางแบบไม่ เชิงเส้นถูกกระตุ้นด้วยคู่ของคลื่นที่เคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้าม เมื่อลำแสงที่ 3 เป็นลำแสงตกกระทบใน ตัวกลาง และคลื่นที่ 4 ถูกสร้างขึ้นมีเฟสตรงกับคลื่นของลำแสงตกกระทบ ซึ่งกระบวนการนี้สามารถตีความได้ ว่าเป็นโฮโลกราฟีที่เกิดขึ้นพร้อมกัน ในตัวกลางจะมีลำแสงตกกระทบและลำแสงอีกลำหนึ่งที่ถูกกระตุ้น ลักษณะความเข้มแสงที่แทรกสอดกันขึ้นอยู่กับค่าแอมพลิจูดสนามไฟฟ้าของคลื่นทั้งสอง ในตัวกลางแบบไม่เชิง เส้นบางชนิด

ในปี ค.ศ.1984 N.V. Kukhtarev และคณะได้ศึกษาและทดลองเกี่ยวกับการเกิดปรากฏการณ์เฟส คอนจุเกชั่นเชิงแสง (Optical Phase conjugation) [4] ในผลึก BaTiO<sub>3</sub> โดยไม่ต้องจ่ายสนามไฟฟ้าจาก ภายนอกให้กับผลึกในการสร้างสนามที่ว่างประจุ (Space-charge field) ซึ่งในการทดลองใช้เลเซอร์อาร์กอน-ไอออนความยาวคลื่น 496.5 นาโนเมตร สามารถสังเกตเห็นปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงและในปี ค.ศ. 1985 Doyle A. Temple และ Cardinal Warde ได้ศึกษาการกระเจิงของแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบน ผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟ เช่น BaTiO<sub>3</sub> และ LiNbO<sub>3</sub>[5]

ในปี ค.ศ. 1995 Changxi Yang และเพื่อนร่วมงานจึงได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติโฟโตรีแฟรกทีฟของ ผลึกแบเรียมไททาเนต กับ ผลึกแบเรียมไททาเนตที่เจือด้วยอะตอมซีเรียม (Ce:BaTiO<sub>3</sub>) [5] ซึ่งในการศึกษา พบว่าผลึกแบเรียมไททาเนตที่เจือด้วยอะตอมซีเรียม สามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption coefficient) สัมประสิทธิ์การขยายอิเล็กโทรออฟติกส์ (Electro-optic gain coefficient) และความหนาแน่น ของกับดักยังผลทั้งหมด (Total effective trap density) อย่างเป็นระบบตามความเข้มข้นของอะตอมซีเรียม (Ce) ที่เพิ่มขึ้น ที่ความยาวคลื่นแสง 514.5 นาโนเมตร และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับสัมประสิทธิ์การ ขยายอิเล็กโทรออฟติกส์ ขึ้นอยู่กับความเข้มแสงที่ตกกระทบ และยังพบว่าเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อแสง (Response time) ของผลึกที่เจือด้วยอะตอมซีเรียมด้วยความเข้มข้น 15 ppm ที่ความเข้มแสง 800 มิลลิวัตต์ต่อ ตารางเมตร ใช้เวลาในการตอบสนองต่อแสงแค่ 220 มิลลิวินาที และสามารถขยายช่วงความยาวคลื่นการ ตอบสนองต่อแสงของผลึกกว้างขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มคุณสมบัติโฟโตรีแฟรกทีฟของผลึกแบเรียมไททาเนต [3]

ในการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงนั้น ตัวกลางที่ใช้นั้นจะต้องเป็นตัวกลางที่มี คุณสมบัติโฟโตรีแฟรกทีฟ ซึ่งเป็นผลึกแบบทัศนศาสตร์อย่างไม่เป็นเชิงเส้นและเป็นผลึกที่มีความเป็นอิเล็กโทร ออปติกส์ ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา ในการใช้เลเซอร์ยิงผ่านเข้าไปในผลึกชนิดไม่เจือด้วยอะตอมของ สารเจือ แต่เป็นที่รู้กันอยู่แล้วว่ามันถูกเจือด้วยเหล็ก ก็จะทำให้เกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงได้แต่ จะต้องใช้เทคนิคหลายๆอย่างเข้ามาช่วย จึงจะทำให้เกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงขึ้นได้และมีการใช้ แสงสีเขียวจากเลเซอร์อาร์กอน-ไอออน ยิงผ่านผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมของซีเรียม ซึ่ง สามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงได้อย่างง่ายแต่สำหรับงานวิจัยนี้จะเป็นการสร้าง ปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงโดยใช้เลเซอร์แสงสีแดงยิง เพื่อให้เกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิง แสงโดยใช้ผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟที่เกิดขึ้นกับผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วย อะตอมซีเรียม
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกตในผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วย
   อะตอมซีเรียมด้วยเรโซเนเตอร์แบบต่างๆ
- 1.2.3 เพื่อศึกษามุมตกกระทบที่เหมาะสมที่สุดระหว่างลำแสงเลเซอร์กับผิวหน้าผลึกในการ เกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกตด้วยความเข้มแสงมากที่สุดหรือสามารถสังเกตลำแสง สะท้อนได้ชัดเจนที่สุด
- 1.2.4 เปรียบเทียบการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกตจากแหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่น แตกต่างกันคือ แสงสีแดงและแสงสีเขียวที่นักวิจัยท่านอื่นๆเคยทำมาแล้ว

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาค้นคว้าและทบทวนบทความวิจัย ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์โฟ-โตรีแฟรกทีฟ และปรากฏการณ์การเฟสคอนจุเกต รวมถึงการประยุกต์ใช้งาน
- 1.3.2 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ การเกิดปรากฏการณ์ เฟสคอนจุเกตและการเดินทางของแสงในตัวกลางแบบไม่เชิงเส้น
- 1.3.3 วัดมุมตกกระทบที่เหมาะสมของลำแสงเลเซอร์ บนผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วย อะตอมซีเรียม โดยวางผลึกบนแท่นที่ติดตั้งอยู่บนรางเลื่อน เพื่อปรับระยะห่างของผลึก เข้าและออกจากแหล่งกำเนิดแสง จนเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกตที่มีความเข้มแสง มากที่สุดหรือสามารถสังเกตลำแสงสะท้อนได้ชัดเจนที่สุด
- 1.3.4 เปรียบเทียบการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกตจากแหล่งกำเนิดเลเซอร์แสงสีแดงและ แสงสีเขียว ที่นักวิจัยท่านอื่นๆเคยทำมาแล้ว

### 1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 จัดเตรียมวัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
- 1.4.3 ติดตั้งอุปกรณ์และจัดระบบการทดลอง
- 1.4.4 ทำการทดลองเพื่อศึกษาการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงตกกระทบในผลึก แบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม
- 1.4.5 บันทึกผลการทดลองที่ได้ระหว่างมุมตกกระทบที่กระทำกับผลึก พร้อมกับวิเคราะห์ค่า PC Reflectivity และเวลาในการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงของเรโซเนเตอร์ทั้ง สองชนิด
- 1.4.6 นำเสนอผลการทดลอง
- 1.4.7 เขียนเล่มรายงาน

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- สามารถอธิบายการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ และปรากฏการณ์การเฟสคอนจุ-เกตที่เกิดขึ้นในวัสดุทางทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นได้
- 1.4.2 สามารถอธิบายอันตรกิริยาของลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบตัวกลางแบบอิเล็กโทรออป-ติกส์ และการเดินทางของแสงออกจากตัวกลางได้
- 1.4.3 สามารถอธิบายหลักการใช้อุปกรณ์ทางแสงในการควบคุมลำแสงเลเซอร์ตามทิศทางที่ ต้องการใช้งาน ตลอดจนข้อควรระวัง การทำความสะอาด และการเก็บรักษาอุปกรณ์ ให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน
- 1.4.4 สามารถออกแบบการทดลอง เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่มีประสิทธิภาพ
- 1.4.5 สามารถนำผลการทดลองที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับงานอื่นๆได้

# บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น

ค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลางโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของอะตอมและการกระจายตัวของ อิเล็กตรอนในตัวกลางนั้น เมื่อส่องสว่างลำแสงลงบนตัวกลาง ทำให้ประจุซึ่งส่วนมากเป็นอิเล็กตรอนถูกกระตุ้น ให้เคลื่อนที่ขึ้นและลงตามทิศการโพลาไรซ์ของสนามไฟฟ้าของแสงตกกระทบ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทำ ให้เกิดการแผ่รังสีและสร้างสนามไฟฟ้าภายในตัวกลาง ซึ่งเป็นสัดส่วนกับสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบ เป็นผลทำให้ เกิดการแปลี่ยนเฟส (Phase) ในการส่งผ่านสนามไฟฟ้า ซึ่งการเปลี่ยนเฟสของสนามไฟฟ้าจะเกิดช้ากว่า ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแสง ถ้าความเข้มของลำแสงตกกระทบมีค่าน้อย ดังนั้นสนามไฟฟ้าของลำแสงต้อง มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับสนามไฟฟ้าภายในอะตอมของตัวกลาง แสดงให้เห็นว่าความเข้มแสงไม่มีผลต่อการ เปลี่ยนเฟสของสนามไฟฟ้า และไม่มีผลต่อการเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลาง ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางทัศน ศาสตร์แบบเชิงเส้น (Linear optics) [1]

เมื่อเปรียบเทียบความเข้มของลำแสงกับสนามไฟฟ้าภายในอะตอม และการกระจายตัวของ อิเล็กตรอนภายในตัวกลาง สามารถถูกกระตุ้นจากการแผ่รังสีของลำแสง เมื่อแสงเดินทางผ่านเข้าในตัวกลาง แสงจะเกิดการหักเหและการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่งผิวหน้าของตัวกลาง ส่งผลให้ค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลาง เปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับความเข้มของลำแสงตกกระทบ (Intensity) ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางทัศนศาสตร์แบบไม่เชิง เส้น (Nonlinear optics) ในระดับพื้นฐานทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นจะศึกษาเกี่ยวกับอันตรกิริยาของลำแสง ภายในวัสดุ การที่เรียกทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นเพราะว่า วัสดุมีความสามารถในการตอบสนองต่อแอมพลิจูด ของสนามไฟฟ้าอย่างไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งการเคลื่อนที่ของลำแสงในวัสดุตัวกลางอธิบายโดยใช้ค่าดัชนีหักเหแสงที่ เปลี่ยนไป ถ้าสามารถควบคุมค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลางได้จากการส่องสว่างของลำแสง ดังนั้นจะสามารถ ควบคุมการเดินทางของลำแสงได้ นำไปสู่การสร้างนวัตกรรมเทคโนโลยีใหม่ ๆ จำนวนมากบนพื้นฐานของการ ควบคุมแสงโดยใช้แสงตกกระทบเพียงลำเดียว

ในทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของแสง วัสดุจะตอบสนองต่อการส่องสว่างของแสง ซึ่งอธิบายโดยใช้ สมการการโพลาไรซ์ของแสง

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

- $\epsilon_0$ คือ สภาพความยอมทางไฟฟ้าในสูญญากาศในหน่วยคูลอมบ์ต่อนิวตัน-เมตร (C/N-m)
- E คือสนามไฟฟ้าของแสงในหน่วยนิวตันต่อคูลอมบ์ (N/C)

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

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

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

ส่วนในทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นการตอบสนองต่อแสงของตัวกลางจะมีลักษณะเฉพาะ โดยมีค่าพารามิเตอร์  $x^{(2)}$  และ  $x^{(3)}$  ทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่น่าสนใจมากมาย และการประยุกต์ใช้จากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น จากเทอมที่ 2 ในสมการ (2.1)  $\epsilon_0 x^{(2)} EE$  เป็นเทอมของการเกิดฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 (ความถี่เป็นสอง เท่า) มีค่าเป็นบวก และมีความถี่ที่แตกต่างกัน เพื่อขยายค่าพารามิเตอร์ และการสั่น ส่วนเทอมที่ 3 ในสมการ (2.1)  $\epsilon_0 x^{(3)} EEE$  เป็นเทอมการเกิดฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 ซึ่งใช้อธิบายการสั่น ส่วนเทอมที่ 3 ในสมการ (2.1)  $\epsilon_0 x^{(3)} EEE$  เป็นเทอมการเกิดฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 ซึ่งใช้อธิบายการเกิดปรากฏการณ์ต่าง ๆ เช่น การกระเจิงของรามาน หรือการเกิดโฟนอนแสง (Raman scattering) การกระเจิงของบริลลูอิน หรือการ เกิดโฟนอนเสียง (Brillouin scattering) และการเกิดเฟสคอนจูเกตเชิงแสง (Optical phase conjugation)

สำหรับแสงตกกระทบตัวกลางที่มีความเข้มต่ำ ๆ เทอมอันดับที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าน้อยมาก และอธิบาย สมการของแสงโดยใช้เฉพาะเทอมที่ 1  $\epsilon_0 \; x^{(1)} \mathbf{E}$  โดยเทอมที่ 2 สามารถเปลี่ยนเพื่อแสดงในตัวแปรของ เทอมที่ 1 ได้ดังสมการ

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

สำหรับตัวกลางทางแสงทั่วไป  $x^{(1)}$  เป็นค่าความไวของสนามไฟฟ้าในอันดับที่ 1 ซึ่งความเข้มของ แสงปกติ หรือแสงสามัญ (Ordinary light) จะเหมือนกับความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ระดับน้ำทะเล และ สนามไฟฟ้าของแสงในอันดับที่ 1 เท่ากับ 10 โวลต์ต่อเซนติเมตร และ  $\Delta x^{(1)}$  เท่ากับ 10<sup>-8</sup> ถึง 10<sup>-10</sup> คูลอมบ์ ต่อเมตร สำหรับลำแสงเลเซอร์ที่มีกำลังปานกลางจะมีสนามไฟฟ้าเทียบกับสนามไฟฟ้าภายในอะตอมของ ตัวกลาง เท่ากับ 10 × 10<sup>6</sup> โวลต์ต่อเซนติเมตร ซึ่งการส่องสว่างลำแสงเลเซอร์ลงบนวัสดุที่เหมาะสมส่งผลให้ ค่าดัชนีการหักเหแสงในตัวกลางนั้น ๆเปลี่ยนแปลง อาจจะมีผลต่อการเดินทางของแสงภายในวัสดุตัวกลางนั้น ด้วย

ก่อนปี ค.ศ. 1961 นักวิทยาศาสตร์ยังไม่มีความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติทางทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น จึง มีการวิจัยทางวิทยาศาสตร์เพื่อแสดงให้เห็นว่าความเข้มของแสง และลำแสงอื่น ๆ ไม่ส่งผลกระทบต่อการ ส่งผ่าน การเลี้ยวเบน และการหักเหของแสงในวัสดุโปร่งแสง เป็นคุณสมบัติทางทัศนศาสตร์เชิงเส้น และ หลักการพื้นฐานของการซ้อนทับของคลื่นแสง และลักษณะเฉพาะของวัสดุโปร่งแสงคือ ความเข้มแสงไม่ส่งผล ต่อค่าดัชนีการหักเหแสงในตัวกลาง ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงสรุปคุณสมบัติทางทัศนศาสตร์แบบเชิงเส้นว่า ความเข้มแสงที่ออกจากตัวกลางที่มีความเข้มสม่ำเสมอจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสงที่ผ่านเข้าไปใน ตัวกลางและความถี่ของแสงที่ผ่านออกจากตัวกลาง หมายความว่าความเข้มแสงที่ผ่านเข้าไปและยังคงอยู่ใน ตัวกลาง ส่วนปรากฏการณ์ทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นยังไม่มีข้อพิสูจน์มาก่อนหน้านี้ ทำให้มีการนำเครื่องมือใน การจัดการและควบคุมความถี่และความเข้มของลำแสงเลเซอร์มาใช้ เพื่อศึกษาและคิดค้นทฤษฎีใหม่ ๆ ของ การประยุกต์ใช้ทางทัศนศาสตร์อย่างกว้างขวาง

เหตุผลหนึ่งก่อนหน้านี้ที่ทำให้การตีความทัศนศาสตร์แบบเชิงเส้นที่นักวิทยาศาสตร์ยังไม่สามารถสร้าง ลำแสงที่มีคุณสมบัติโคฮีเรนท์ได้ (แสงที่มีความยาวคลื่นเดียว) ซึ่งทำให้ถูกตีความว่าเป็นปรากฏการณ์แบบไม่ เชิงเส้น ในปี ค.ศ. 1961 การทดลองการเกิดฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2 เป็นการทดลองครั้งแรกเพื่อยืนยันทฤษฎี ทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น โดยทดลองนำเลเซอร์ทับทิม (Ruby laser) มีความยาวคลื่น 0.6943 ไมโครเมตร ส่องสว่างลงบนผิวหน้าของแผ่นผลึกควอทซ์ ผลการทดลองพบว่ามีการแผ่รังสีของคลื่นแสงออกมา โดยใช้ เครื่องสเปกโทรมิเตอร์ในการตรวจสอบและมีการแผ่รังสีของแสงเป็นความถี่ที่สองของความถี่แสงตกกระทบ บนแผ่นผลึกควอทซ์ (ความยาวคลื่นเท่ากับ 0.34715 ไมโครเมตร) [1]

ตั้งแต่มีการทดลองศึกษาการเกิดฮาร์มอนิกของแสง ส่งผลให้การศึกษาเพื่อหาสนามไฟฟ้าทางทัศน ศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นก็ได้เป็นที่รู้จักกันอย่างรวดเร็ว และได้ค้นพบปรากฏการณ์ทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นที่ แตกต่างกัน เช่น การผสมพารามิเตอร์ของแสง (Optical parametric mixing) การกระเจิงของบริลลูอิน (Stimulated Brillouin scattering) ปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกต (Phase conjugate) การผสมคลื่น (Wave mixing) และ อื่น ๆ ซึ่งปรากฏการณ์ทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น ต้องใช้ลำแสงเลเซอร์ที่มีความเข้มสูง โดยเฉพาะในกระบวนการศึกษาการเกิดฮาร์มอนิกอันดับที่สูงขึ้นต้องใช้ความเข้มแสงที่สูงมาก (ฮาร์มอนิก อันดับที่ 3 ขึ้นไป)

### 2.2 ปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ

ปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟในตัวกลางแบบอิเล็กโทรออฟติกส์เป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้ดัชนีหักเห แสงในตัวกลางเปลี่ยนเนื่องจากความเข้มแสงที่ผ่านเข้ามาในพื้นที่ว่างของตัวกลาง ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ได้รับ ความสนใจเป็นอย่างมาก เมื่อ ในปี ค.ศ. 1966 Ashkin et. al. ได้ค้นพบเป็นครั้งแรก ในผลึกลิเทียมไนโอเบต (LiNbO<sub>3</sub>) โดยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการส่องผ่านของลำแสงเลเซอร์ ซึ่งเป็นแสงที่มีคุณสมบัติความเป็นโคฮี เรนท์ (Coherent light) ผ่านผลึกแบบอิเล็กโทรออฟติกส์ ในการศึกษาครั้งนี้พบว่า ลำแสงเลเซอร์ที่ผ่านผลึกอิ เล็กโทรออฟติกส์ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลาง และสามารถเกิดปรากฏการณ์โฟโต รีแฟรกทีฟขึ้น ต่อมาได้มีการทดลองและสังเกตปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟในตัวกลางจำนวนมาก ยกตัวอย่างเช่น ลิเทียมไนโอเบต (LiNbO<sub>3</sub>) แบเรียมไททาเนต (BaTiO<sub>3</sub>) แกลเลียมอาเซไนด์ (GaAs) แคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) อินเดียมฟอสไฟด์ (InP) วัสดุบ่อศักย์ควอนตัมแบบหลายบ่อ (Multi quantum well materials) และวัสดุออร์แกนิก (Organic material) หรือ พอลิเมอร์บางชนิด

## 2.2.1 แบบจำลองการเคลื่อนย้ายประจุระหว่างแถบพลังงาน

การพิจารณาจากแบบจำลองการเคลื่อนย้ายประจุระหว่างแถบพลังงาน (Band transport model) หรือ สมการของคุกทาเรฟ (Kukhtarev's equation) ซึ่งเป็นผู้สร้างแบบจำลองขึ้นมาเพื่อใช้อธิบายการเกิด ปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ โดยในแบบจำลองพื้นฐานตัวกลางโฟโตรีแฟรกทีฟ ประกอบด้วยสารเจือบาง ชนิด หรืออาจมีความไม่สมบูรณ์ในตัวกลางนั้น ดังนั้นในการอธิบายหลักการอย่างง่ายของการเกิด ปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟถือว่าสารเจือผู้ให้ (Donor impurity) ทั้งหมดเหมือนกันและอยู่ที่ระดับพลังงาน เดียวกันในแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งสารเจือผู้ให้เหล่านั้นสามารถแตกตัวเป็น ไอออนได้เนื่องจากการดูดกลืนโฟตอนจากแสงที่ตกกระทบตัวกลาง และการแตกตัวเป็นไอออนทำให้ อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่เข้าไปบริเวณแถบนำกระแสได้ (Conduction band) ปล่อยเป็นที่ว่างไว้ที่ ตำแหน่งเดิมและสารเจือผู้ให้กลายเป็นไอออนมีความสามารถในการจับกับอิเล็กตรอนอิสระได้อีกครั้ง กำหนดให้

- N<sub>D</sub> คือความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้ในหน่วยอะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (atom/cm<sup>3</sup>)
- N<sup>i</sup> คือความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้เป็นไอออนในหน่วยอะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (atom/cm<sup>3</sup>)
- N คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ ในหน่วยอะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (atom/cm<sup>3</sup>)
- s คือภาพตัดขวางในตัวกลางจากการกระตุ้นด้วยแสง ในหน่วยตารางเซนติเมตร (cm<sup>2</sup>)
- I คือความเข้มแสง ในหน่วยมิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (mW/cm<sup>2</sup>)
- β คือ อัตราการเกิดความร้อนของอิเล็กตรอน
- $\gamma_R$  คืออัตราการรวมตัวกันใหม่ระหว่างกับดักที่เป็นไอออนกับอิเล็กตรอน



**รูปที่ 2.1** แสดงการดูดกลืนโฟตอนของอิเล็กตรอนเข้าสู่แถบนำกระแส ด้วยแบบจำลองการเกิด ปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ

จากการดูดกลื่นโฟตอนของแสงด้วยสารเจือผู้ให้จะได้สมการอัตราการเกิดอิเล็กตรอนอิสระคือ  $(sI + \beta)(N_D - N_D^i)$  และเมื่ออิเล็กตรอนอิสระถูกจับกับสารเจือที่เป็นไอออน หรือ กับดัก (Trap) สามารถเขียน สมการอัตราการจับอิเล็กตรอนของกับดักคือ  $\gamma_R N_D N_D^i$  ส่วนสมการอัตราการเกิดความหนาแน่นไอออน  $N_D^i$  สามารถละเทอมการสร้างความร้อนไปได้ เพราะ  $\beta \ll sI$  ดังนั้นสามารถเขียนสมการการเกิดความ หนาแน่นไอออน ดังสมการ

$$\frac{\partial N_{D}^{i}}{\partial t} = sI(N_{D} - N_{D}^{i}) - \gamma_{R}NN_{D}^{i}$$
(2.4)

สำหรับไอออนของสารเจือทั้งหมดที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา หรืออิเล็กตรอนจะถูกจับใหม่อีกครั้งเมื่อเติม สารเจือใหม่ลงในที่ว่างของตัวกลาง ดังนั้นอัตราการเกิดอิเล็กตรอนเท่ากับอัตราการเกิดไอออนของสารเจือ นอกจากว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในขณะที่สารเจืออยู่กับที่ไม่เกิดการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งเป็นกระบวนการ สำคัญสำหรับการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ และการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระอาจส่งผลต่อความ หนาแน่นของอิเล็กตรอน ดังนั้นสมการอัตราความหนาแน่นของอิเล็กตรอนคือ

$$\frac{\partial \mathbf{N}}{\partial t} - \frac{\partial \mathbf{N}_{\mathrm{D}}^{\mathrm{i}}}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla . \mathbf{j}$$
(2.5)

เมื่อ **j** คือ ความหนาแน่นกระแส ในหน่วยแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (A/cm<sup>2</sup>) q คือ ประจุของอิเล็กตรอน ( 1.602 x 10<sup>-19</sup> คูลอมบ์)

จากสมการแสดงให้เห็นว่าประจุพาหะ หรืออิเล็กตรอน ทำให้เกิดสนามที่ว่างประจุ (Space-charge field) ซึ่ง ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของประจุพาหะ ดังนั้นความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอนประกอบด้วยส่วนที่เกิดจาก การไหลของประจุพาหะเนื่องจากสนามไฟฟ้า และการแพร่กระจายเนื่องจากแกรเดียนต์ของความหนาแน่น ประจุพาหะ สามารถเขียนสมการได้ ดังนี้

$$\mathbf{j} = \mathbf{q}\mathbf{N}\mathbf{\mu}\mathbf{E} + \mathbf{k}_{\mathbf{B}}\mathbf{T}\mathbf{\mu}\nabla\mathbf{N}$$
(2.6)

E คือ สนามไฟฟ้า ในหน่วยนิวตันต่อคูลอมบ์ (N/C)

 ${f k}_B T$  คือ ผลคูณระหว่างค่าคงตัวโบลต์มันน์กับอุณหภูมิ ในหน่วยจูลต่อโมล (J/mol)

และอธิบายสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยใช้สมการของปัวส์ซง (Poisson's equation)

$$\nabla \cdot \epsilon \mathbf{E} = \rho(\mathbf{r}) = -q(\mathbf{N} + \mathbf{N}_{\mathbf{A}} - \mathbf{N}_{\mathbf{D}}^{\mathbf{i}})$$
(2.7)

เมื่อ ε คือสภาพความยอมทางไฟฟ้าของตัวกลางในหน่วยคูลอมบ์ต่อนิวตัน-เมตร (C/N-m) ρ(r) คือค่าความหนาแน่นประจุ ในหน่วยคูลอมบ์ต่อลูกบาศก์เมตร (C/m<sup>3</sup>) N<sub>A</sub> คือความหนาแน่นของสารเจือผู้รับในหน่วยอะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (atom/cm<sup>3</sup>)

ซึ่งสารเจือผู้รับ (Acceptor impurity) มีความสำคัญต่อความเป็นกลางทางไฟฟ้าของประจุ ในกรณีที่ไม่มีการ ส่องสว่างแสง ความเป็นกลางของประจุสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\left(\mathbf{N} + \mathbf{N}_{\mathbf{A}} - \mathbf{N}_{\mathbf{D}}^{\mathbf{i}}\right) = \mathbf{0} \tag{2.8}$$

ในกรณีที่ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยมาก ทำให้  $N_D^i = N_A$  ในสภาวะที่ไม่มีแสง หรือ ความ เข้มของสารเจือผู้ให้ เท่ากับ ความหนาแน่นของสารเจือผู้รับ จากสมการ (2.6) เทอมแรก ( $qN\mu E$ ) แสดงถึง ความหนาแน่นกระแสจากการไหลของประจุพาหะเนื่องจากสนามไฟฟ้า และเทอมที่สอง ( $k_B T \mu \nabla N$ ) แสดงถึงความหนาแน่นกระแสจากการแพร่กระจายเนื่องจากแกรเดียนต์ ของประจุ แต่ในกรณีนี้เราไม่ พิจารณากระแสเนื่องจากปรากฏการณ์โฟโตโวลเทอิก (Photovoltaic effect) เนื่องจากมีค่าน้อยมากเมื่อ เทียบกับกระแสที่เกิดจากประจุพาหะ

รูปที่ 2.1 ประกอบด้วยสารเจือผู้ให้และสารเจือผู้รับ โดยปกติความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้จะ มากกว่าความหนาแน่นของสารเจือผู้รับ และสมมุติว่าสารเจือทั้งหมดเหมือนกัน ในกรณีที่ไม่มีอิเล็กตรอนใน แถบนำกระแส และไม่มีโฮลในแถบวาเลนซ์ ความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้ที่เป็นไอออนจะเท่ากับสารเจือผู้รับ ซึ่งสารเจือผู้ให้ที่เป็นกลางสามารถให้อิเล็กตรอนจากการกระตุ้นด้วยแสง (Photonexcitation) และไอออน ของสารเจือผู้ให้จำนวนหนึ่งสามารถจับกับโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) ในแบบจำลองนี้สารเจือผู้รับมี หน้าที่เพียงทำให้ประจุเป็นกลางทางไฟฟ้า ไม่ได้มีผลโดยตรงต่อกระบวนการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ ในส่วนนี้เราจะพิจารณาการที่แสงเลเซอร์ 2 ลำเดินทางเข้าสู่ตัวกลางโฟโตรีแฟรกทีฟ เขียนสมการ

สนามไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_{a} \exp(i\omega t - i\mathbf{k}_{a} \cdot \mathbf{r}) + \mathbf{E}_{b} \exp(i\omega t - i\mathbf{k}_{b} \cdot \mathbf{r})$$
(2.9)

(2.11)

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

 $I_0 = |E_a|^2 + |E_b|^2$ 

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

เมื่อ

$$\mathbf{I}_1 = 2\mathbf{E}_\mathbf{b} \cdot \mathbf{E}_\mathbf{a}^* \tag{2.12}$$

และ K คือเวกเตอร์คลื่นเกรตติง (Grating wave vector)

$$\mathbf{K} = \mathbf{k}_{\mathrm{b}} - \mathbf{k}_{\mathrm{a}} \tag{2.13}$$

ขนาดของเวกเตอร์คลื่นเกรตติงสัมพันธ์กับคาบ (  $\Lambda$  ) ของรูปแบบการแทรกสอดของลำแสง

$$\mathbf{K} = 2\pi/\Lambda \tag{2.14}$$

ซึ่งเวกเตอร์คลื่นเกรตติงมีค่าสูงสุดเมื่อคลื่นทั้ง 2 มีการโพลาไรซ์ในทิศทางเดียวกันและมีขนาดเท่ากัน คือ  ${f E}_{
m a}={f E}_{
m b}$  ดังนั้นความเข้มของแสงในกรณีนี้คือ

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_0 \left( \mathbf{1} + \cos \mathbf{K} \cdot \mathbf{r} \right) \tag{2.15}$$

จากสมการแสดงถึงแถวของแถบการแทรกสอด และแถบมืดเกิดขึ้นที่ **K** · **r** = (2m + 1)π เมื่อความ เข้มแสง I = 0

พิจารณาขณะที่ส่องสว่างลำแสงเลเซอร์เข้าสู่ตัวกลางโฟโตรีแฟรกทีฟ บริเวณที่มีความสว่างค่า cosK · r เข้าใกล้ 1 และ I เท่ากับ 2I<sub>0</sub> ซึ่งประจุที่แตกตัวเป็นไอออน (Photoionized charge) เกิดจาก การดูดกลืนโฟตอน (Photon) และพาหะประจุเหล่านั้น หรืออิเล็กตรอนสามารถกระจายออกไปบริเวณที่มี ความสว่าง สิ่งที่เหลืออยู่คือสารเจือผู้ให้ที่แตกตัวเป็นไอออน ถ้าพาหะประจุเหล่านั้นถูกจับในบริเวณที่ไม่มีแสง สว่าง ประจุจะไม่แตกตัวเพราะไม่มีแสงสว่างมากระตุ้น โดยแสดงการแยกประจุดังรูปที่ 2.2 ผลจากการส่อง สว่างแสงที่มีความเป็นโคฮีเรนท์ลงบนตัวกลางโฟโตรีแฟรกทีฟ บริเวณที่ไม่มีแสงสว่างประจุจะเป็นลบ ส่วน บริเวณที่มีความสว่างประจุจะเป็นบวก โดยการแยกที่ว่างประจุ (Space-charge) เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งการกระจายของกระแส (Diffusion current) สมดุลกับการไหลของกระแส (Drift current) ซึ่ง องค์ประกอบพื้นฐานของความหนาแน่นที่ว่างประจุ (Space-charge density) สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\rho = \rho_0 \cos \mathbf{K} \cdot \mathbf{r} \tag{2.16}$$

เมื่อ  $ho_0$  คือค่าคงตัว และทำการอินทิกรัลสมการของปัวส์ซงจากสมการที่ (2.7 ) จะได้

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

เราทราบว่าสนามที่ว่างประจุเฟสถูกเลื่อนไปตำแหน่งที่ว่าง π/2 หรือ 90 องศา สัมพันธ์กับความเข้มแสง และ สนามที่ว่างประจุนี้ไปเหนี่ยวนำให้ค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลางเปลี่ยนแปลง ตามปรากฏการณ์ของพอคเกลส์ (Pockel'effect) รูปที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ของความเข้มแสง ความหนาแน่นของที่ว่างประจุ สนามที่ว่างประจุ และการเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหแสงจากการถูกเหนี่ยวนำด้วยที่ว่างประจุเหล่านั้น

สามารถสรุปกระบวนการพื้นฐานในการเกิดปรากฏการณ์โพโตรีแฟรกในผลึกแบบอิเล็กโทรออปติกส์ (Electro-optic) ประกอบด้วย 5 กระบวนการ คือ

- การเกิดไอออนจากการดูดกลื่นโฟตอน (Photoionization) ของสารเจือผู้ให้ และเกิดประจุพาหะหรือ อิเล็กตรอนอิสระ
- 2. การเคลื่อนที่ของประจุพาหะ ตามแถบการแทรกสอดของลำแสง
- 3. การจับประจุพาหะ และสร้างความหนาแน่นของที่ว่างประจุ
- 4. การสร้างสนามไฟฟ้าของที่ว่างประจุ จากการเหนี่ยวนำด้วยแสง
- 5. การสร้างดัชนีเกรตติง ซึ่งเป็นปรากฏการณ์แบบเชิงเส้นในผลึกแบบอิเล็กโทรออปติกส์



**รูปที่ 2.2** แสดงกระบวนการสร้างดัชนีเกรตติงด้วยการแทรกสอดของคู่ลำแสงตกกระทบที่มีความ เข้มแสงแบบเป็นคาบลงบนตัวกลางแบบอิเล็กโทรออปติกส์

ปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟเป็นปรากฏการณ์ที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าและต้องเกิดประจุพาหะ และ การกระจายของประจุพาหะจำนวนมาก โดยปกติความหนาแน่นของประจุพาหะอยู่ในระดับ 10<sup>15</sup> ต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร (cm<sup>-3</sup>) ใช้ความเข้มการส่องสว่างในสมการที่ (2.10) เพื่อหาค่าสนามที่ว่างประจุในฟังก์ชัน r และ t โดยใช้ สมการ (2.4) และ (2.7) ซึ่งสมการคำตอบแบบปิดโดยทั่วไปไม่สามารถใช้ได้สำหรับกรณีนี้ ดังนั้นจึงอธิบาย ประจุพาหะที่สถานะคงตัว โดยกำหนดให้เวลา (t) ในการดิฟเฟอเรนเชียล เท่ากับ 0 จะได้สมการที่สถานะคง ตัวตามสมการ (2.4) และ (2.7) คือ

$$sI (N_{A} - N_{D}^{i}) - \gamma_{R}NN_{D}^{i} = 0$$
  

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

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

$$\nabla \cdot \epsilon \mathbf{E} = \rho(\mathbf{r}) = -q(N + N_{A} - N_{D}^{i})$$
(2.18)

ใช้สมการเหล่านี้เพื่อหาผลเฉลยของสมการสนามไฟฟ้า (E) ในเทอมของความเข้มแสง I(r) ดังนั้นสมการคำตอบ แบบปิดสามารถใช้ในกรณีที่ความเข้มแสงในการกระตุ้นประจุพาหะมีค่าน้อยมาก กล่าวคือ |I<sub>1</sub>| « I<sub>0</sub> จาก ข้อสมมุติฐานดังกล่าวสามารถละเทอมฮาร์มอนิกอันดับที่สูงกว่าได้ และสามารถเขียนสมการที่สถานะคงตัวได้ ดังนี้

$$\mathbf{N}(\mathbf{r}) = \mathbf{N}_0 + \operatorname{Re}\{\mathbf{N}_1 \, \mathrm{e}^{-\mathrm{i}\mathbf{K}\cdot\mathbf{r}}\}$$
(2.19)

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

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

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

เมื่อ N<sub>0</sub>, N<sup>i</sup><sub>D0</sub>, **j**<sub>0</sub>, **E**<sub>0</sub>, N<sub>1</sub>, N<sup>i</sup><sub>D1</sub>, **j**<sub>1</sub>, **E**<sub>1</sub> คือ ค่าคงตัว ปัญหาคือเราต้องแก้สมการสำหรับค่าคงตัว เหล่านี้ในเทอมของ I<sub>0</sub> และ I<sub>1</sub> ดังนั้นจะแก้สมการเพื่อหาปริมาณทางฟิสิกส์เหล่านี้ โดยเริ่มพิจารณาจากกรณี I<sub>1</sub> เท่ากับ 0 ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อส่องสว่างลำแสง 1 ลำแบบสม่ำเสมอ (Uniform illumination) หรือลำแสง 2 ลำ ด้วยแกนโพลาไรซ์ตั้งฉากกัน ดังนั้นความเข้มแสง I<sub>1</sub> = 2E<sub>b</sub> · E<sub>a</sub><sup>\*</sup> = 0 และในกรณีที่ส่องสว่างลำแสง แบบความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงเป็นคาบ (Periodic indensity variation)

<u>กรณีที่ 1</u> การส่องสว่างแสงแบบสม่ำเสมอ (Uniform illumination : I<sub>1</sub> = 0) กรณีนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเชิง พื้นที่ของปริมาณทางฟิสิกส์ทั้งหมด ดังนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ของความหนาแน่นประจุพาหะคือ

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

$$\left(\mathbf{N} + \mathbf{N}_{\mathrm{A}} - \mathbf{N}_{\mathrm{D}}^{\mathrm{i}}\right) = \mathbf{0} \tag{2.24}$$

สมการทั้ง 2 สามารถใช้เพื่อหาตัวแปรที่ไม่ทราบค่า คือ N และ N<sup>i</sup><sub>D</sub> จากสมการ (2.23) ได้ความหนาแน่นของ สารเจือผู้ให้ที่แตกตัวเป็นไอออน (N<sup>i</sup><sub>D</sub>)

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

ความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้ที่แตกตัวเป็นไอออน  $({
m N}_D^i)$  นี้ ต้องเกิดจากการส่องสว่างแสงแบบสม่ำเสมอ เมื่อแทนสมการ (2.25) ลงในสมการ (2.24) จะได้สมการกำลังสองสำหรับค่า N

$$\gamma_{\rm R} N^2 + (sI + \gamma_{\rm R} N_{\rm A}) N + sI(N_{\rm A} - N_{\rm D}) = 0$$

จากสมการสามารถหาคำตอบเพื่อหาค่า N ได้ ถ้าสมมุติว่าค่า N  $\ll$  N<sub>A</sub> และ sI  $\ll$   $\gamma_R$ N<sub>A</sub> ดังนั้นคำตอบ ของสมการ คือ

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

ซึ่งความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจะต้องส่องสว่างด้วยความเข้มแสง (I) ที่สม่ำเสมอ ดังนั้นสามารถหาค่าความ หนาแน่นของสารเจือผู้ให้ที่แตกตัวเป็นไอออน  $({
m N}^{
m i}_{
m D})$  ดังสมการ

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

<u>กรณีที่ 2</u> การส่องสว่างแสงแบบเป็นคาบ (Periodic illumination : I<sub>1</sub> ≠ 0) พิจารณาในกรณีการส่องสว่าง แสงแบบเป็นคาบ ๆ ความเข้มแสง I<sub>1</sub> ≠ 0 ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อแสงแบบโคฮีเรนท์ 2 ลำตัดกันภายในตัวกลาง เมื่อ แทนสมการ (2.31) ถึง (2.34) และพิจารณาเฉพาะเทอมของฮาร์มอนิกส์อันดับแรกเท่านั้น จะได้ระบบสมการ ดังนี้ [1]

$$sI_{1}(N_{D} - N_{D0}^{i}) + sI_{0}(-N_{D1}^{i}) - \gamma_{R}N_{1}N_{D0}^{i} - \gamma_{R}N_{0}N_{D1}^{i} = 0$$
 (2.28)

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

$$\mathbf{K} \cdot (qN_{1}\mu\mathbf{E}_{0} + qN_{0}\mu\mathbf{E}_{1} - ik_{B}T\mu\mathbf{K}N_{1}) = 0$$
 (2.30)

$$-\mathbf{i}\mathbf{K}\cdot\boldsymbol{\epsilon}\mathbf{E}_{1} = -q(\mathbf{N}_{1}-\mathbf{N}_{D1}^{i})$$
(2.31)

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

ในสมการเหล่านี้ตัวแปร N<sub>A</sub>, N<sub>D</sub> และ **E**<sub>0</sub> คือ ค่าคงตัว ส่วน N<sub>0</sub> และ N<sup>i</sup><sub>D0</sub> สามารถหาได้จากการแก้สมการที่ (2.29) และ (2.32) ซึ่งผลที่ได้เหมือนกับในสมการที่ (2.26) และ (2.27) ตามลำดับ ส่วนสมการที่เหลืออีก 3 สมการนำไปใช้หาค่า N<sub>1</sub>, N<sup>i</sup><sub>D1</sub> และ **E**<sub>1</sub>

จากสมการแมกซ์เวลล์ ข้อที่ 4 (Curl Maxwell equation) ในกรณีที่อยู่ในสถานะคงตัว ∇ x **E** = 0 ทำให้ K x **E**<sub>1</sub> = 0 หมายความว่า E<sub>1</sub> เท่ากับ K หลังจากที่คำนวณ และประมาณค่าของเทอมพีชคณิตต่าง ๆ ทำให้เราสามารถหาค่าสนามที่ว่างประจุได้ดังสมการ

$$\mathbf{E}_{1} = \frac{\mathbf{i}\mathbf{K}\frac{\mathbf{k}_{\mathrm{B}}\mathbf{T}}{\mathbf{q}} - \frac{\mathbf{K}\cdot\mathbf{\mu}\mathbf{E}_{0}}{\mathbf{K}\langle\mathbf{\mu}\rangle}}{1 + \frac{\mathbf{K}^{2}}{\mathbf{k}_{\mathrm{D}}^{2}} + \mathbf{i}\frac{\mathbf{q}\mathbf{K}\cdot\mathbf{\mu}\mathbf{E}_{0}}{\mathbf{k}_{\mathrm{B}}\mathbf{T}\mathbf{k}_{\mathrm{D}}^{2}\langle\mathbf{\mu}\rangle}} \frac{\mathbf{I}_{1}}{\mathbf{I}_{0}}$$
(2.33)

เมื่อ

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

และ  $\langle \epsilon \rangle$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกยังผล (Effective dielectric constant) (C/N-m)  $\langle \mu \rangle$  คือ ค่าความคล่องตัวยังผล (Effective mobility) (m<sup>2</sup>/V-s)

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

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

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

ในกรณีนี้เมื่อสนามไฟฟ้ากะแสตรง (E<sub>0</sub>) มีค่าเท่ากับเวกเตอร์เกรตติง (K) สามารถลดรูปสมการที่ (2.33) ได้เป็น

$$\mathbf{E}_{1} = \frac{\mathbf{i}\mathbf{K}\frac{\mathbf{k}_{\mathrm{B}}\mathbf{T}}{\mathbf{q}} - \frac{\mathbf{K}\cdot\mathbf{E}_{0}}{\mathbf{K}}}{1 + \frac{\mathbf{K}^{2}}{\mathbf{k}_{\mathrm{D}}^{2}} + \mathbf{i}\frac{\mathbf{q}\mathbf{K}\cdot\mathbf{E}_{0}}{\mathbf{k}_{\mathrm{B}}\mathrm{T}\mathbf{k}_{\mathrm{D}}^{2}}} \frac{\mathbf{I}_{1}}{\mathbf{I}_{0}}$$
(2.37)

และสามารถลดเทอมที่มีค่าสนามไฟฟ้าอยู่ กรณีที่ E = 0 ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่สนามไฟฟ้ากระจายอย่าง สม่ำเสมอ ดังนั้นสนามที่ว่างประจุ (Space-charge field) สามารถลดรูปได้เป็น

$$\mathbf{E}_{1} = \frac{i\mathbf{K}\frac{\mathbf{k}_{B}T}{q}}{1 + \frac{\mathbf{K}^{2}}{\mathbf{k}_{D}^{2}}} \frac{\mathbf{I}_{1}}{\mathbf{I}_{0}}$$
(2.38)

สมการทั้งสองใช้สำหรับหาค่าสนามที่ว่างประจุ เป็นสมการที่สำคัญเพื่อหาแบบจำลองการการ เคลื่อนย้ายประจุระหว่างแถบพลังงาน ซึ่ง K คือ เวกเตอร์คลื่นเกรตติง ค่า  $k_D$  หาได้จากสมการที่ (2.34) และ ทราบค่าเลขคลื่นของเดอบาย (Debye wave number) จากทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในพลาสมา อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ออกนอกฉากในสนามคูลอมบ์ (Coulomb field) ของประจุทดสอบด้วยระยะทาง  $\Lambda_D = 2\pi/k_D$  ซึ่งระยะทาง คือรัศมีฉากของเดอบายโดยอธิบายด้วยความสมดุลระหว่างพลังงานจลน์ ความร้อน กับพลังงานไฟฟ้าสถิตของประจุพาหะเหล่านั้น ในกรณีนี้เมื่อ  $N_D \gg N_A$  ดังนั้นสามารถเขียน สมการ  $k_D$  จาก (2.34) ได้ใหม่เป็น

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

เมื่อ N<sup>i</sup>D0 คือค่าความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้ที่แตกตัวเป็นไอออน ซึ่งประจุที่เป็นบวกสามารถจับกับ อิเล็กตรอนได้

### 2.2.2 การเดินทางของคลื่นแสงในตัวกลางแบบเป็นคาบ

หลาย ๆ ความสำคัญและปรากฏการณ์ที่มีประโยชน์ ซึ่งเกี่ยวข้องกับประกฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ เนื่องจากการกระเจิงของแสงจากเกรตติง หรือภาพฮอโลแกรมที่เกิดขึ้นในผลึก ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวได้แก่ การผสมกันของคลื่น (Wave mixing) การเกิดเฟสคอนจูเกต (Phase conjugate) ไดนามิกฮอโลกราฟี (Dynamic holography) และอื่น ๆ โดยเกรตติงหรือภาพฮอโลแกรมในตัวกลางเหล่านี้แสดงได้จากการ เปลี่ยนแปลงแบบเป็นคาบของดัชนีการหักเหแสง ซึ่งคุณสมบัติทั่วไปของการเดินทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใน ตัวกลางแบบเป็นคาบ ๆ โดยเริ่มพิจารณาจากหลักการพื้นฐานการกระเจิงของแบรกก์ (Bragg scattering) และการอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัม

โดยทั่ว ๆ ไปตัวกลางแบบเป็นคาบจะมีโครงสร้างใด ๆ ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กทริก การสะท้อนแบบ สมมาตรเป็นฟังก์ชันแบบคาบของตำแหน่ง

$$\epsilon(x) = \epsilon(x+a) \tag{2.40}$$

เมื่อ a คือเวกเตอร์คงตัว ในกรณีของตัวกลางที่เป็นคาบแบบ 1 มิติ เขียนสมการ (2.40) ได้เป็น

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

หรือ

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

เมื่อ z คือตัวชี้วัดตำแหน่ง และ  $\Lambda$  คือคาบ ตามความหมายโดยทั่วไปตัวกลางแบบเป็นคาบหมายถึง เฟสเกรต ติง (Phase grating) ซึ่งประกอบด้วยแผ่นกระจกบาง ๆ ที่มีแถวของช่องว่างระยะห่างเท่า ๆ กันขนานกัน เกรตติงสะท้อน (Reflecting grating ) ประกอบด้วยผิวโลหะแบนที่มีแถวของช่องว่างระยะห่างเท่ากัน ๆ ขนานกัน โฮโลแกรมแบบปริมาตร (Volume hologram) ประกอบด้วยตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยดัชนี การหักเหแสงถูกเปลี่ยนเป็นคาบ ซึ่งแถวระนาบสามมิติเป็นคาบของอะตอม เช่น ตัวกลางที่เป็นผลึก

วัสดุโฟโตรีแฟรกทีฟสามารถเป็นตัวกลางแบบเป็นคาบได้ด้วยการเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลาง แบบเป็นช่วง ๆ ซึ่งทำได้โดยการส่องสว่างแสงด้วยความเข้มแสงที่มีความเป็นโคฮีเรนท์ลงบนพื้นที่ตัวกลาง ดังนั้นสามารถเขียนค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลางแบบเป็นคาบได้ดังสมการ

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

เมื่อ  $\mathbf{n_0}$  และ  $\mathbf{n_1}$  คือ ค่าคงตัว และ p(z) คือ ฟังก์ชันแบบเป็นคาบของ z

$$p(z) = p(z + \Lambda) \tag{2.44}$$

โดย

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

และ

$$\int_{0}^{\Lambda} p(z) dz = 0$$
 (2.46)

ในสมการที่ (2.43) ค่า  ${f n_0}$  คือดัชนีการหักเหแสงของวัสดุเมื่อไม่มีการกระตุ้นด้วยแสง และ  ${f n_1}$  คือ ค่าดัชนี หักเหแสงในตัวกลางเมื่อมีการส่องสว่างแสงเข้าไปในตัวกลาง หรืออาจเรียก  ${f n_1}$  ว่าดัชนีมอดูเลตเชิงลึก โดยที่ วัสดุโฟโตรีแฟรกทีฟเกือบทุกชนิดค่า  ${f n_1}$  อยู่ในระดับ 10<sup>-3</sup> ถึง 10<sup>-5</sup>

พิจารณาการกระเจิงของคลื่นระนาบแบบแสงเอกรงค์ (Monochromatic plane wave) จาก ตัวกลางแบบเป็นคาบ ดังแสดงในรูป 2.3 ซึ่งการศึกษาการกระเจิงดังกล่าวมีผลมาจากการเลี้ยวเบนของรังสี เอ็กซ์ (X-ray diffraction ) ในของแข็ง โดยพิจารณาเมื่อดัชนีมอดูเลตถูกรวมกันที่แถวของระนาบที่มีระยะเท่า ๆ กัน นอกจากนี้เราถือว่าระนาบเหล่านี้มีไม่จำกัด หรือมีจำนวนอนันต์ ดังนั้นการหักเหจากระนาบเป็นการ สะท้อนเหมือนกับการสะท้อนจากกระจกเงา ที่มีมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน โดยแต่ละระนาบสะท้อน เพียงส่วนน้อยมาก ๆ ของคลื่นระนาบตกกระทบ ซึ่งแสงที่ถูกกระเจิงประกอบด้วยการซ้อนทับแบบเชิงเส้นของ คลื่นระนาบที่ถูกหักเหเหล่านั้น ส่วนลำแสงเลี้ยวเบนเกิดเมื่อคลื่นระนาบที่ถูกสะท้อนเหล่านั้นเกิดขึ้น



รูปที่ 2.3 แสดงการกระเจิงของคลื่นระนาบจากแสงเอกรงค์ลงบนตัวกลางแบบเป็นคาบ [1]

กำหนดให้  $\Lambda$  คือ ระยะระหว่างระนาบของคลื่น ซึ่งเป็นคาบของการเปลี่ยนดัชนีหักเหแสง ความ แตกต่างเส้นทางของรังสีที่สะท้อนจากระนาบ 2 ระนาบที่อยู่ติดกันมีค่าเท่ากับ  $2\Lambda\sin\theta$  เมื่อ  $\theta$  คือ มุม ระหว่างรังสีกับระนาบ และการแทรกสอดของคลื่นเกิดขึ้นเมื่อความแตกต่างของเส้นทางรังสีเป็นจำนวนเต็ม ของความยาวคลื่น  $\lambda/n$  ในตัวกลาง ดังนั้นสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$2\Lambda\sin\theta = N(\lambda/n) \tag{2.47}$$

เมื่อ  $\mathbf{n} = \mathbf{n}_0$  คือดัชนีหักเหแสงเฉลี่ยในที่ว่างของการหักเหแสงในตัวกลาง และ N คือ จำนวนเต็ม ซึ่งเป็น กฎการเลี้ยวเบนของแบรกก์ (Bragg diffraction) ถึงแม้การสะท้อนของรังสีแต่ละระนาบเป็นเหมือนการ สะท้อนจากกระจกเงา แต่ลำแสงเลี้ยวเบนเกิดขึ้นเพียงค่าของมุมที่แน่นอน ( $\mathbf{0}$ ) ตามหลักการเลี้ยวเบนของ แบรกก์ ดังนั้นการสะท้อนจากระนาบทั้งหมดเกิดขึ้นเป็นระยะ จากสมการ (2.47) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$2\mathbf{k}\sin\theta = N\frac{2\pi}{\Lambda} \tag{2.48}$$

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

$$\mathbf{K} = \frac{2\pi}{\Lambda} \tag{2.49}$$

เทอมด้านซ้ายของสมการ (2.48) **2k** sin **0** คือ การเปลี่ยนเวกเตอร์คลื่นเมื่อคลื่นเลี้ยวเบนจากตัวกลางแบบ เป็นคาบ ดังนั้นจากหลักการเลี้ยวเบนของแบรกก์ สามารถตีความได้ว่าเป็นเพียงการอนุรักษ์โมเมนตัม เมื่อคลื่น เลี้ยวเบนจากตัวกลางแบบเป็นคาบ (Grating) จะเกิดการเปลี่ยนเวกเตอร์คลื่นคือ การเปลี่ยนจำนวนเต็มของ เวกเตอร์คลื่นเกรตติง

ในความเป็นจริง ถ้าแยกฟังก์ชันคาบในสมการ (2.43) ลงในองค์ประกอบของฟูริเยร์ สามารถเขียน สมการได้ดังนี้

$$\mathbf{n}(z) = \mathbf{n}_0 + n_1 \sum_{\mathrm{m}} \mathbf{a}_{\mathrm{m}} \exp(-\mathrm{i}\frac{2\pi}{\Lambda} \mathrm{mz})$$
(2.50)

เมื่อ  $\mathbf{a_m}$  คือ องค์ประกอบฟูริเยร์อันดับที่ m ของการเปลี่ยนดัชนีหักเหแสงแบบเป็นคาบ โดยทราบว่า องค์ประกอบฟูริเยร์อันดับที่ m เป็นเลขคลื่น  $\mathbf{m}(2\pi/\Lambda)$  ซึ่งองค์ประกอบแต่ละตัวของฟูริเยร์กระจายตาม อันดับการเลี้ยวเบนของแบรกก์ ถึงแม้กฎการเลี้ยวเบนของแบรกก์ อธิบายตัวกลางที่มีเกรตติงไม่จำกัด ผลใน สมการ (2.47) และ (2.48) ถูกต้องตามขนาดของระนาบการหักเหเหล่านั้น ซึ่งต้องมีค่ามากกว่าขนาดของ ลำแสง ภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้ตัวกลางแบบเป็นคาบถูกเรียกว่าเกรตติงหนา (Thick grating) หรือเกรตติง ปริมาตร (Volume grating)



รูปที่ 2.4 แสดงการเลี้ยวเบนแสงในตัวกลางแบบเป็นคาบจากเกรติงแบบบาง [1]

จากรูปที่ 2.4 เราพิจารณากรณีของเกรตติงบาง ๆ ซึ่งเกรตติงแบบนี้ขนาดตามขวางของการ เปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหแสงแบบเป็นคาบขนาดค่อนข้างเล็กเมื่อเทียบกับขนาดของลำแสงหรือความยาวคลื่น ของแสง เมื่อคลื่นระนาบตกกระทบลงในตัวกลางแบบเป็นคาบ การเลี้ยวเบนของคลื่นแต่ละระนาบเกิดขึ้นจาก การสะท้อนแบบการสะท้อนจากกระจกเงา ซึ่งการเลี้ยวเบนแสงแต่ละระนาบเหล่านี้เป็นผลมาจากขนาดที่ จำกัดของระนาบ เนื่องจากระนาบที่จำกัดนี้ช่วยให้แสงที่กระเจิงถูกบังคับตามมุม θ' ซึ่งมีค่าแตกต่างจากมุม ตกกระทบ θ การใช้เหตุผลที่คล้ายกันในสมการที่ (2.47) ดังนั้นได้เงื่อนไขสำหรับสร้างการแทรกสอดของคลื่น

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

เมื่อ N คือ จำนวนเต็ม จากสมการ (2.51) มีชุดของอันดับการเลี้ยวเบนแสงสำหรับมุมใด ๆ ของการตก กระทบ ซึ่งเป็นความแตกต่างระหว่างเกรตติงแบบบาง (Thin grating) และ เกรตติงแบบหนา (Thick grating) โดยเกรตติงแบบหนามีเพียงการเลี้ยวเบนเพียงอันดับเดียว นอกจากนี้การเลี้ยวเบนเกิดขึ้นเพียงเมื่อมุมตก กระทบเป็นไปตามกฎของแบรกก์เท่านั้น

### 2.2.3 ปรากฏการณ์การผสมคลื่นในตัวกลางโฟโตรีแฟรกทีฟ

### 2.2.3.1 ปรากฏการณ์ผสมคลื่น 2 ขบวน

เมื่อลำแสง 2 ลำของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติโคฮีเรนท์ตัดกันภายในตัวกลางโฟโตรีแฟรก ทีฟ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงแบบเป็นคาบของความเข้มแสงเนื่องจากการแทรกสอดทำให้เกิดดัชนีเกรตติงแบบหนา (Volume index grating) ภายในตัวกลาง โดยเวกเตอร์คลื่นเกรตติง (Grating wave vector) ได้จาก K = ±(k<sub>2</sub> - k<sub>1</sub>) เมื่อ k<sub>1</sub> และ k<sub>2</sub> คือ เวกเตอร์คลื่นของลำแสงที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งการเกิดดัชนีเกรตติงมีผลต่อ ทิศทางการเคลื่อนที่ของลำแสงทั้ง 2 ลำในตัวกลาง ในความเป็นจริงคลื่นแสงเหล่านี้ถูกเลี้ยวเบนด้วยดัชนีเกรต ติง จากการกระเจิงของแบรกก์เมื่อเฟสของคลื่นทั้ง 2 ตรงกันจะทำให้คลื่นทั้งสองสามารถแทรกสอดกันด้วย



## **รูปที่ 2.5** แสดงการผสมคลื่นสองขบวน (Two-Wave Mixing)

จากรูปที่ 2.8 (a) เมื่อลำแสงเลเซอร์  $B_1$  และ  $B_2$  ตัดกัน จะเกิดการแทรกสอดกันในบริเวณที่มีการ ตัดกัน (b) เป็นรูปแบบของการแทรกสอดที่เกิดขึ้นโดยลำแสงทั้งสองตัดกันเป็นเกิดเป็นมุมระหว่างลำแสงทั้ง สอง (c) แสดงเวกเตอร์คลื่นของลำแสงทั้งสองที่ตัดกัน รวมถึงเวกเตอร์  $K_L$  ที่เกิดขึ้นด้วย



รูปที่ 2.6 แสดงการกระเจิงของแบรกก์เนื่องจากเกรตติงแบบหนาในตัวกลางโฟโตรีเฟรกทีฟ [1]

จากรูปที่ 2.6 แสงลำที่ 1 (A<sub>1</sub>) กระเจิงด้วยดัชนีเกรตติง และเลี้ยวเบนไปตามทิศการเคลื่อนที่ของแสงลำที่ 2 (A<sub>2</sub>) ส่วนแสงลำที่ 2 (A<sub>2</sub>) กระเจิงด้วยดัชนีเกรตติงเดียวกัน และสร้างลำแสงเลี้ยวเบนเดินทางไปตามทิศการ เคลื่อนที่ของแสงลำที่ 1 (A<sub>1</sub>) ซึ่งกระบวนการที่เกิดขึ้นนำไปสู่การคับปลิงพลังงาน (Energy coupling) ระหว่าง ลำแสง และเกิดการกระเจิงการเลี้ยวบนด้วยตัวเอง (Self-diffraction)

### 2.2.3.2 ปรากฏการณ์ผสมคลื่น 4 ขบวน

ปรากฏการณ์ผสมคลื่น 4 ขบวน (Four-wave mixing :FWM) เป็นวิธีที่ใช้สำหรับการสร้างคลื่นเฟส คอนจูเกต (Phase conjugate) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดในตัวกลางแบบไม่เชิงเส้นถูกกระตุ้นด้วยคู่ของ ลำแสงเลเซอร์ที่มีทิศการเคลื่อนที่ตรงข้ามกัน เมื่อสัญญาณของลำแสงตกกระทบภายในตัวกลาง ลำแสงที่ 4 จะถูกสร้างขึ้น ซึ่งลำแสงนี้มีทิศทางการเคลื่อนที่ตรงข้ามกับลำแสงตกกระทบ และเป็นแบบผันกลับเวลากับ ลำแสงตกกระทบ โดยการคับปลิงลำแสงทั้ง 4 ลำนี้ในตัวกลางโฟโตรีแฟรกทีฟ [1]

จากรูปที่ 2.8 เราพิจารณาการแทรกสอดลำแสงทั้ง 4 ลำในตัวกลางโฟโตรีแฟรกทีฟ ซึ่งกำหนดให้ ลำแสงทั้งหมดมีความถี่เชิงมุมเหมือนกัน เท่ากับ *w* สามารถเขียนสนามไฟฟ้าดังสมการ

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

เมื่อ A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub>, A<sub>4</sub> คือแอมพลิจูดเชิงซ้อนของคลื่นแสงทั้ง 4 ลำ ในหน่วยนิวตันต่อคูลอมบ์ (N/C)

 $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4$  คือเวกเตอร์คลื่นของลำแสงทั้ง 4 ลำ ในหน่วยต่อเมตร (m<sup>-1</sup>) ในสมการที่ (2.80) กำหนดให้ เวกเตอร์คลื่นทั้งหมดอยู่ในระนาบเดียวกัน และคลื่นทั้งหมดมีทิศการโพลาไรซ์ ตั้งฉากกับระนาบของคลื่น ในกรณีที่  $\mathbf{A}_3 = \mathbf{A}_4 = \mathbf{0}$  ดังนั้นมีคลื่นแสงเพียง 2 ลำ และมีเกรตติงโฟโตรี แฟรกทีฟเพียงตัวเดียว สามารถเขียนสมการทั้ง 2 ได้ ดังนี้

$$\frac{d}{dz}A_1 = -\frac{1}{2}\Gamma(A_1A_2^*)A_2/I_0$$
(2.57)

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

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

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

และ

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



รูปที่ 2.7 แสดงการผสมคลื่นสี่ขบวน (Four -Wave Mixing)

จากรูปที่ 2.7 (a) ลำแสง  $B_3$  เป็นลำแสงหลักที่ผ่านเข้าไปตัดกับลำแสงอื่น นั่นคือ ลำแสง  $B_1$  และ  $B_2$  ซึ่งทำให้เกิดเป็นลำแสง  $B_4$  มุมของลำแสงใหม่สามารถคำนวณได้จากไดอะแกรมของเวกเตอร์คลื่น ดัง แสดงในรูป (b)ซึ่งแสดงรูปแบบการเกิด  $B_4$ ได้ดังรูป (c) (d) เป็นการแทรกสอดระหว่าง  $B_3$  และ  $B_2$  โดยมี การสะท้อนของลำแสง  $B_1$  เข้าไปแทรกสอด ทำให้เกิด  $B_4$ 



รูปที่ 2.8 แสดงปรากฏการณ์การผสมคลื่น 4 ขบวนในตัวกลางโฟโตรีแฟรกทีฟ [1]

- ก) การผสมคลื่น 4 ขบวน ด้วยเกรตติงแบบส่งผ่าน (Transmission grating) เกรตติงเกิดขึ้นจากคู่ ของลำแสง (A<sub>1</sub>, A<sub>3</sub>) หรือ คู่ของลำแสง (A<sub>2</sub>, A<sub>4</sub>)
- ข) การผสมคลื่น 4 ขบวน ด้วยเกรตติงแบบสะท้อน (Reflection grating) เกรตติง เกิดขึ้นจากคู่ของลำแสง (A1, A3) หรือ คู่ของลำแสง (A2, A4)

ในสมการที่ (2.57) และ (2.58) เทอมของ  ${
m A_1A_2^*}$  แสดงถึงแอมพลิจูดของรูปแบบเกรตติงด้วย  ${
m A_1}$  และ  ${
m A_2}$ ซึ่งแสดงถึงคลื่นทั้ง 4 โดยทั่วไปมีเกรตติง 6 ตัวในตัวกลาง ในกรณีปรากฏการณ์การผสมคลื่น 4 ขบวน แต่ สำหรับคลื่นเฟสคอนจูเกตค่าของเวกเตอร์คลื่นมาจากคู่ของลำแสงที่เดินทางในทิศทางตรงข้ามกัน

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

ถ้าสมมุติว่าคลื่นเหล่านั้นเดินทางเข้าในตัวกลางที่สมมาตรดังแสดงในรูป 2.10 แล้วมีเกรตติงที่แตกต่างกัน 4 ตัว ซึ่งเกรตติงเหล่านี้แสดงโดย  $(A_1A_2^* + A_3A_4^*)$ ,  $(A_2A_4^* + A_1A_3^*)$ ,  $(A_2A_3^*)$  และ  $(A_1A_4^*)$ 

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

#### 2.3 ปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสง

เฟสคอนจุเกตเป็นอุปกรณ์ทางแสงที่สามารถสร้างได้จากแบบจำลองของเวลาย้อนกลับ (timereversed) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบ ปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกตนั้นมีความสำคัญในระบบทางแสง ซึ่งต้องการการส่งผ่านคลื่นแสงผ่านไปยังตัวกลางที่เกิดการกระเจิง เช่น ในบรรยากาศ โดยการเกิดคลื่นเฟส คอนจุเกตเป็นปรากฏการณ์ในทัศนศาสตร์แบบไม่เป็นเชิงเส้น(Non-linear optics) ในผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟ (Photorefractive crystals) อาทิเช่น แบเรียมไททาเนต(BaTiO<sub>3</sub>), สตรอนเทียมแบเรียมไนโอเบต ( $Sr_xBa_{1-x}Nb_2O_6$ หรือ SBN),บิสมัทซิลิคอนออกไซด์ (BSO) ซึ่งเป็นผลึกที่มีประสิทธิภาพสำหรับการ เกิดคลื่นเฟสคอนจุเกต

การเกิดคลื่นเฟสคอนจูเกต (Phase cujugate waves) ถ้าการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกอธิบาย ด้วยสมการ

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

เมื่อ **E**<sub>0</sub> คือ แอมพลิจูดสนามไฟฟ้าเป็นค่าคงตัว ในหน่วยนิวตันต่อคูลอมบ์ (N/C)

- ω คือ ความถี่เชิงมุม ในหน่วยเรเดียนซ์ต่อวินาที (rad/s)
- k คือ เลขคลื่น ในหน่วยต่อเมตร (m<sup>-1</sup>)
- Ø คือ เฟสของคลื่น ในหน่วยเรเดียนซ์ (rad.)

การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดังกล่าวในตัวกลางสามารถแสดงการเคลื่อนที่ของหน้าคลื่นได้ดัง สมการ

$$\mathbf{kz} + \mathbf{\emptyset}(\mathbf{z}) = \mathbf{k_0}$$
 ;  $\mathbf{k_0}$  เป็นค่าคงตัว (2.53)

คลื่นเฟสคอนจูเกตของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสมการที่ (2.76) สามารถเขียนได้เป็น

$$\mathbf{E}_{c} = \mathbf{E}_{0} \cos[\omega t + \mathbf{k}z + \boldsymbol{\emptyset}(z)]$$
(2.54)

เราทราบว่าหน้าคลื่นของ **E**<sub>c</sub> เหมือนกับหน้าคลื่นของ **E** ซึ่งคลื่นทั้งสองเหล่านี้เป็นรูปแบบของเฟสคอนจูเกต ซึ่งมีหน้าคลื่นเหมือนกัน แต่เคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้าม ในหลักการพื้นฐานคลื่นเฟสคอนจูเกตสามารถสร้าง โดยใช้กระจกที่มีผิวหน้าเหมือนกับหน้าคลื่นของคลื่นตกกระทบ เทคนิคนี้เรียกว่าการปรับหน้าคลื่นแสง (Adaptive optics) ซึ่งเราต้องรู้ว่าหน้าคลื่นของรังสีที่ผ่านเข้ามามีลักษณะแบบไหน การใช้กระจกที่สามารถ เปลี่ยนรูปได้ที่ขับเคลื่อนด้วยตัวกระตุ้นทางกล โดยผิวหน้าของกระจกสามารถเปลี่ยนตามลักษณะของหน้า คลื่นที่ผ่านเข้ามา และมีเทคนิคอินเตอร์เฟอโรมิทรี (Interferometry technique) สามารถวัดลักษณะหน้า คลื่นของรังสีที่ผ่านเข้ามา ซึ่งผลที่ได้จากการวัดลักษณะของหน้าคลื่นด้วยวิธีนี้สามารถนำมาใช้เพื่อเตรียม กระจกให้มีลักษณะผิวหน้าเหมือนกับหน้าคลื่นของรังสีตกกระทบ



รูปที่ 2.9 แสดงหลักการพื้นฐานของเทคนิค การปรับหน้าคลื่นแสง (Adaptive optics)

การทดลองในปี ค.ศ. 1972 พบว่าหน้าคลื่นของรังสีที่ถูกกระเจิงกลับจากการถูกกระตุ้นด้วยการ กระเจิงของบริลลูอิน (Stimulated Brillouin scattering : SBS) เป็นแบบจำลองเวลาผันกลับของลำแสงที่ กระตุ้นจากลำแสงตกกระทบ โดยยิงรังสีจากเลเซอร์ทับทิมแบบพัลล์เดี่ยวเข้าไปในเซลล์ SBS เมื่อตรวจสอบ รังสีและหน้าคลื่นที่กระเจิงกลับ พบว่ารังสีนั้นมีลักษณะเหมือนกับรังสีตกกระทบ จากการทดลองพบว่าคลื่น เฟสคอนจูเกตใน SBS มีอัตราความเข้มแสงเป็นสองเท่าของคลื่นที่มีเฟสไม่ตรงกัน ดังนั้นสัมประสิทธิ์ความเข้ม แสงแบบเอ็กโพเนนเซียลเป็นความแตกต่างอย่างมากกับความเข้มแสงของคลื่นแสงเหล่านั้น และไม่กี่ปีต่อมา ผลการการทดลองข้างต้นถูกนำเสนอและแสดงให้เห็นว่าปรากฏการณ์การผสมคลื่นแสง 4 ขบวน (Optical four-wave mixing :FWM) สามารถสร้างคลื่นเฟสคอนจูเกตได้ โดย FWM ในทัศนศาสตร์ตัวกลางแบบไม่เชิง เส้นถูกกระตุ้นด้วยคู่ของคลื่นที่เคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้าม เมื่อลำแสงที่ 3 เป็นลำแสงตกกระทบในตัวกลาง และคลื่นที่ 4 ถูกสร้างขึ้นมีเฟสตรงกับคลื่นของลำแสงตกกระทบ ซึ่งกระบวนการนี้สามารถตีความได้ว่าเป็นฮอ โลกราฟีที่เกิดขึ้นพร้อมกัน ในตัวกลางจะมีลำแสงตกกระทบและลำแสงอีกลำหนึ่งที่ถูกกระตุ้น ลักษณะความ เข้มแสงที่แทรกสอดกันขึ้นอยู่กับค่าแอมพลิจูดสนามไฟฟ้าของคลื่นทั้งสอง ในตัวกลางแบบไม่เชิงเส้นบางชนิด สามารถเขียนค่าดัชนีหักเหแสง ดังสมการ[1]

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

เมื่อ n<sub>0</sub>, n<sub>2</sub> คือ ค่าคงตัวในหน่วยตารางเซนติเมตรต่อวัตต์ (cm<sup>2</sup>/W) และ I คือความเข้มแสงในหน่วยมิลลิ วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (mW/cm<sup>2</sup>) ซึ่งค่งคงตัว n<sub>2</sub> เป็นที่รู้กันว่าเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของเคอร์ (Kerr coefficient) ในแก้วเชิงแสงมีค่าเท่ากับ 3.2 x 10<sup>-16</sup> cm<sup>2</sup>/W เป็นผลเนื่องมาจากการตอบสนองแบบไม่เชิง เส้นของตัวกลาง ทำให้เกิดการสร้างดัชนีเกตติงขึ้น ซึ่งดัชนีเกรตติงที่ถูกสร้างขึ้นนี้เกิดจากลำแสงอื่นที่ถูก กระตุ้น และลำแสงที่หักเหมีเฟสเดียวกันกับลำแสงตกกระทบตัวกลาง

ทั้ง SBS และ FWM เป็นกระบวนการในการเกิดฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 ซึ่งต้องการรังสีที่มีความเข้มแสง มาก ๆ ระดับเมกกะวัตต์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (MW/cm<sup>2</sup>) สำหรับการสร้างที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งเทคนิคทัศน ศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นสำหรับการสร้างคลื่นเฟสคอนจูเกตไม่จำเป็นต้องรู้ลักษณะหน้าคลื่นของรังสีที่ผ่านเข้ามา เนื่องจากการผสมคลื่นแสง 4 ขบวน ในตัวกลางแบบไม่เชิงเส้นจะเหมือนกับฮอโลกราฟฟิกที่เกิดในเวลา เดียวกัน ซึ่งตัวกลางฮอโลกราฟฟิกสามารถสร้างคลื่นเฟสคอนจูเกตได้ แต่ความเข้มแสงในระดับวัตต์ต่อตาราง เซนติเมตร (W/cm<sup>2</sup>) ก็สามารถสร้างการผสมคลื่น 4 ขบวน และคลื่นเฟสคอนจูเกตอย่างมีประสิทธิภาพได้



ร**ูปที่ 2.10** แสดงการเปรียบเทียบ คุณสมบัติการสะท้อนของกระจกธรรมดา(Ordinary Mirror) กับกระจกเฟสคอนจุเกต (Phase Conjugate Mirror)



# ร**ูปที่ 2.11** แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของ PCM กับ กระจกแบบธรรมดา เมื่อคลื่นตกกระทบ เมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางซึ่งบิดเบือน

จากรูปที่ 2.11 (a) แสดงคลื่นตกกระทบเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางซึ่งมีการบิดเบือน โดยเมื่อคลื่นตก กระทบเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางซึ่งมีการบิดเบือนนั้นจะทำให้หน้าคลื่นที่ผ่านออกมานั้นมีการผิดรูปไปจากหน้า คลื่นตกกระทบ และเมื่อตกกระทบกระจกแบบธรรมดาก็จะเกิดการสะท้อนกลับโดยกระจกแบบธรรมดานั้นจะ ทำให้หน้าคลื่นที่สะท้อนกลับนั้นมีหน้าคลื่นตรงข้ามกับหน้าคลื่นที่ผ่านตัวกลางออกมา ดังรูป (b) แต่เมื่อตก กระทบกระจกแบบเฟสคอนจุเกตจะทำให้หน้าคลื่นที่สะท้อนกลับนั้นมีหน้าคลื่นเหมือนกันกับหน้าคลื่นเดิมที่ ผ่านตัวกลางออกมาดังรูป (c)

#### 2.3.1 ปรากฏการณ์ Beam Fanning

Beam fanning คือกระบวนการคลัปปลิ้งของลำแสงสองลำ (two-beam coupling) ในกรณีนี้จะมี เพียงลำแสงเดียวที่ตกกระทบบนผลึกและพลังงานของมันจะถูกถ่ายโอนเข้ามาในแสงที่มีการกระเจิง ซึ่งเป็นผล มาจากการถ่ายโอนพลังงาน แสงที่เกิดการกระเจิงจะถูกขยายและแผ่ออกโดยจะสังเกตเห็นได้ ซึ่งทิศทางการ ถ่ายโอนพลังงานสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการกลับขั้วของสนามไฟฟ้าที่ใช้ ปรากฏการณ์ Beam Fanning สามารถทำให้ลำแสงที่แผ่ออกนั้นขยายหรือลดได้ขึ้นอยู่กับขั้วของสนามไฟฟ้าที่ใช้ ในกรณีนี้ขั้วของสนามไฟฟ้า ที่ใช้จะมีผลให้ปรากฏการณ์ Beam fanning ขยายออกมากซึ่งกำลังของลำแสงที่ส่งผ่านตัวกลางโฟโตรีแฟรก ทีฟออกมานั้นจะลดลง



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

Beam fanning จะไม่สมมาตรและลำแสงจะมีการเบนของลำแสงในผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟ ส่วนหนึ่ง ของลำแสงที่ตกกระทบจะเกิดการกระเจิงในผลึกที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันและมีการเติมสารเจือในผลึกนั้น ส่วนที่ เหลือของลำแสงตกกระทบจะเกิดอันตรกิริยากับส่วนที่กระเจิงโดยการผสมคลื่นสองขบวน ซึ่งนำไปสู่การขยาย ของแสงที่กระเจิงในทิศทางของการถ่านโอนพลังงาน



**รูปที่ 2.13** แสดงลำแสงขณะเกิดปรากฏการณ์ Beam fanning

# บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 ศึกษาคุณสมบัติของผลึก

ตัวกลางที่ใช้ในการสร้างลำแสงเลี้ยวเบนของปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสง จะต้องเป็นตัวกลางที่มี คุณสมบัติโฟโตรีแฟรกทีฟที่ดี ซึ่งเป็นผลึกแบบทัศนศาสตร์ไม่เชิงเส้น และเป็นผลึกที่มีความเป็นอิเล็กโทรออ ปติกส์ (Electro optic) โดยผลึกที่นำมาใช้ในการทดลองศึกษาลำแสงเลี้ยวเบนของปรากฏการณ์เฟสคอนจุ เกชั่นเชิงแสงนั้น คือ ผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม (Ce : BaTiO<sub>3</sub>)

### 3.1.1 ผลึกแบเรียมไททาเนต

ผลึกแบเรียมไททาเนต (BaTiO<sub>3</sub>) เป็นหนึ่งในวัสดุเฟอโรอิเล็กทริก (Feroelectric material) ชนิด แรก ๆ ที่ได้ถูกค้นพบ และเป็นวัสดุที่ได้รับการยอมรับว่าเป็นตัวกลางที่มีคุณสมบัติโพโตรี แฟรกทีฟได้เป็น อย่างดี ซึ่งจัดอยู่ในสารประกอบแบบ ABO<sub>3</sub> ที่มีโครงสร้างอยู่ในตระกูลเพอรอฟ สไกต์ (Perovskite) ของ ผลึกเฟอโรอิเล็กทริก โดยสารประกอบชนิดอื่นที่อยู่ในตระกูลนี้เหมือนกัน เช่น KNbO<sub>3</sub>, KTaO<sub>3</sub>, PbTiO<sub>3</sub>, LiNbO<sub>3</sub> และ SrTiO<sub>3</sub> ซึ่งสารประกอบประเภทนี้สามารถเปลี่ยนโครงสร้างได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยอุณหภูมิ วิกฤตที่มีผลต่อการเปลี่ยนโครงสร้างผลึก (Curie temperature : T<sub>c</sub>) ประมาณ 120 องศาเซลเซียส เมื่อ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตโครงสร้างผลึกเป็นแบบลูกบาศก์ (Cubic) มีความสมมาตร โดยมี ไอออน Ti<sup>4+</sup> อยู่ที่ตำแหน่งกลางของหน่วยเซลล์ ไอออน O<sup>2-</sup> อยู่ที่ผิวหน้าของหน่วยเซลล์ และไอออน Ba<sup>2+</sup> อยู่ที่มุมของหน่วยเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1(ก) เมื่อผลึก BaTiO<sub>3</sub> เปลี่ยนเฟส/โครงสร้างเป็นแบบเตทระ โกนอล (Tetragonal) เฟสเฟอโรอิเล็กทริกที่อุณหภูมิวิกฤต และเฟสเตทระโกนอลยังคงเสถียรที่อุณหภูมิห้อง แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำมาก ๆ ประมาณ 5 องศาเซลเซียสหน่วยเซลล์จะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นแบบออโทรอมบิก (Orthorhombic) มีจุดกลุ่มแบบ 2mm (จุดกลุ่มสมมาตร 4mm) ที่อุณหภูมิห้องหน่วยเซลล์จะเกิดโดโพล โมเมนต์ทางไฟฟ้า (Electric dipole moment) ขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนดำแหน่งของไอออน Ba<sup>2+</sup> กับ Ti<sup>4+</sup> ที่ ลัมพันธ์กับไอออน O<sup>2-</sup> ทำให้โครงสร้างผลึกเกิดความไม่สมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1(ข)

การเปลี่ยนตำแหน่งของไอออนในหน่วยเซลล์ทำให้เกิดการสร้างแกนโพลาไรซ์ได้ หรือแกนแสง (caxis) ของผลึกในทิศทางการเคลื่อนที่ของไอออน ที่อุณหภูมิห้องสามารถสังเกตเห็นการอิ่มตัวของแกน โพลาไรซ์ (P<sub>s</sub>) มีค่าประมาณ 8 x 10<sup>14</sup> esu cm<sup>2</sup> ซึ่งคุณสมบัติที่ทราบกันดีในสารประกอบแบบเพอรอฟสไกต์ เช่น การเกิดปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect) และการเกิดฮาร์มอนิกส์อันดับที่สองจาก ขั้วที่เกิดขึ้นเองในผลึก BaTiO<sub>3</sub> โดยที่การโพลาไรซ์ที่สร้างขึ้นอาจจะมีทิศตามแกนของลูกบาศก์ในผลึกที่ถูก สร้างขึ้น <001> ซึ่งผลึก BaTiO<sub>3</sub> มีเฟส/โครงสร้างแบบเทตระโกนอล [8]



**รูปที่ 3.1** ก) โครงสร้างผลึกแบเรียมไททาเนต เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต ข) โครงสร้างผลึกแบเรียมไททาเนต เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต

ตารางที่ 3.1 แสดงโครงสร้างผลึกของแบเรียมไททาเนตในช่วงอุณหภูมิต่างๆ

ช่วงอุณหภูมิ (°C)	โครงสร้างผลึก
ต่ำกว่า -90	รอมโบฮีดรัล (rhombohedral)
ตั้งแต่ -90 ถึง 5	ออโทรอมบิก (Orthorhombic)
สูงกว่า 5 ถึง 120	เตตระโกนอล (Tetragonal)
สูงกว่า 120	ลูกบาศก์ (Cubic)

เพราะว่าองค์ประกอบเทนเซอร์อิเล็กโทรออปติกส์ (Electro optic tenser : r<sub>42</sub>) ของ BaTiO<sub>3</sub> มีค่าโต มาก ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพเกรตติง (Grating efficiency) มีค่าสูง อัตราขยายการคับปลิงลำแสง (Beam coupling gain) ที่มีประสิทธิภาพ และเพิ่มอัตราการเกิดการผสมคลื่น 4 ขบวน หรือการสร้างคลื่นเฟสคอนจู เกต ซึ่งผลึก BaTiO<sub>3</sub> มีคุณสมบัติเฉพาะสำหรับการประยุกต์ใช้ด้านการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ ดัง ตัวอย่างที่ Feinberg et.al ได้สังเกตการสะท้อนกลับของการเกิด การผสมคลื่น 4 ขบวนซึ่งมีค่าสูงประมาณ 20 ในผลึก BaTiO<sub>3</sub> โดยไม่ต้องจ่ายสนามไฟฟ้าให้กับผลึก ซึ่งการสะท้อนกลับที่มีค่าสูงของการเกิด ปรากฏการณ์การผสมคลื่นนี้เป็นสิ่งที่ดีสำหรับการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจูเกชั่นเชิงแสง

### 3.1.2 ผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม

ผลึกแบเรียมไททาเนตที่ไม่ได้เจือด้วยอะตอมของสารเจือเป็นวัสดุโพโตรีแฟรกทีฟที่ตอบสนองต่อ สเปกตรัมแสงในช่วงความยาวคลื่นสีเขียวได้ดีที่สุดเพราะระดับพลังงานของผู้ให้ (Donor) อยู่เหนือแถบวา เลนซ์ประมาณ 2.4 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังนั้นจึงต้องเติมสารเจือซึ่งใช้พลังงานในการกระตุ้นต่ำ ๆ เพื่อขยายช่วง การตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงที่กว้างขึ้น จึงมีการทดลองเจืออะตอมสารเจือหลายชนิดลงในสารประกอบ BaTiO<sub>3</sub> เช่น Fe, Co, Ce, และ Rh ถึงแม้ผลึก BaTiO<sub>3</sub> ชนิดเจือด้วย Fe ไม่มีความสำคัญต่อการพัฒนา ประสิทธิภาพของผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟ แต่สามารถเพิ่มความเป็นวัสดุโฟโตรีแฟรกทีฟของผลึก BaTiO<sub>3</sub> ในการ ตอบสนองต่อช่วงความยาวคลื่นแสงสีแดงและอินฟราเรด โดยการเจือด้วยอะตอมโรเดียม (Rh) และการเจือ ด้วยอะตอมโคบอล (Co) ผลึกจะมีความเป็นวัสดุโพโตรีแฟรกทีฟ และสามารถตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสง ในช่วงอินฟราเรดระยะใกล้ ส่วนสารเจืออื่นที่ได้รับความนิยมมาก คือ อะตอมซีเรียม (Ce) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยแสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) กับฟังก์ชันของความยาวคลื่นแสง (λ) สำหรับผลึกแบเรียมไททา เนตที่ไม่ได้เติมอะตอมของสารเจือกับผลึกแบเรียมไททาเนตที่เจือด้วยอะตอมซีเรียม จากกราฟพบว่าเมื่อเติม สารเจือซีเรียมในผลึกแบเรียมไททาเนตทำให้ผลึกสามารถตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงที่กว้างขึ้นและมีค่า สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบที่ความยาวคลื่นเดียวกัน



**รูปที่ 3.2** แสดงกราฟการดูดกลืนแสงของผลึกแบเรียมไททาเนตที่ไม่ได้เติมอะตอมของสารเจือกับ ผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม



**รูปที่ 3.3** แสดงกราฟการดูดกลืนแสงของผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียมที่ระดับ ความเข้มข้นต่าง ๆ



**รูปที่ 3.4** แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ถูกเหนี่ยวนำของผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอม ซีเรียม กับความเข้มแสงโดยใช้แสงความยาวคลื่น 514 นาโนเมตร

การใช้แบบจำลองกับดักอิเล็กตรอนแบบลึกและตื้น (Deep-and shallow-trap model) ซึ่ง Yang et al. ใช้อธิบายการดูดกลืนแสงและคุณสมบัติเด่นของโฟโตรีแฟรกทีฟในผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วย อะตอมซีเรียม ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยแสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ( $\alpha$ ) กับฟังก์ชันของความยาว คลื่นแสง ( $\lambda$ ) สำหรับผลึกแบเรียมไททาเนตที่เจือด้วยอะตอมซีเรียมที่มีความเข้มข้นของการเจือแตกต่างกัน 4 ค่า และผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดไม่เจือด้วยอะตอมของสารเจือ และพลอตกราฟผลของสัมประสิทธิ์การ ดูดกลืนแสงที่ถูกเหนี่ยวนำ ( $\Delta \alpha$ ) สำหรับผลึกตัวอย่างที่มีโครงสร้างแบบลูกบาศก์ ดังแสดงในรูป 3.4 ซึ่งค่า ( $\Delta \alpha$ ) จากกราฟเป็นไปตามทฤษฎีในสมการ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอะตอมซีเรียมค่าสัมประสิทธิ์อิเล็กโทร ออปติกส์ และอัตราการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น การคับปลิงแสงมากขึ้น และการเหนี่ยวนำแสงเข้าใกล้ความเป็น เชิงเส้นมาก

	tetragonal 4 m					
โครงสร้างผลึก (Crystal structure)	9 ℃ ( 48.2 °F	=)< T <	135 °C ( 2	75 °F)		
	a = 3.99 Å, c = 4.04 Å (at 26 °C)					
วิธีการปลูกผลึก (Growth method)	TSSG (Top se	eded solu	ution grow	th)		
จุดหลอมเหลว (Melting point)	1625 °C					
ความหนาแน่น (Density)	6.06 g/cm <sup>2</sup> ที่	อุณหภูมิ 26	5 °C			
ความแข็ง (Hardness)	Mohs 5					
ช่องว่างพลังงาน (Bandgap)	3.2 eV ที่อุณห	ภูมิ 300 °ห	( ผลึกเดี่ยว			
ช่วงการส่งผ่าน (Transmission range)	0.43 – 6.30 <b>L</b>	m				
	$\lambda$ (nm)	515	633	800		
ดัชนีหักเหแสง (Refractive indices)	n <sub>0</sub>	2.4912	2.4160	2.3681		
	n <sub>e</sub>	2.4247	2.3630	2.3235		
	$r_{13}^{T} = 8.0 \pm 2$	2.0 pm/v				
คาสมบระสทธิอเสกเพรออบดกส	$r_{33}^{T} = 105 \pm 10 \text{ pm/v}$					
(Electro optic coemcients)	$r_{42}^{T} = 1300 \pm$	: 100 pm/	V			
	Reflectivity o	f SPPC (0°	° - cut)			
		50 – 70% สำหรับ <i>ใ</i> = 515				
	Ce: Bario <sub>3</sub>	nm				
ค.ศ. 2012 เมื่อรีบ ฟรากที่ฟ		40 – 60% สำหรับλ = 515				
(Chotorofractive properties)	Pure Dario <sub>3</sub>	nm				
(Fnotorenactive properties)		50 - 80	50 – 80% สำหรับ <i>น</i> = 633			
	Ce. bario <sub>3</sub>	nm				
	Duro BaTiO	40 - 600	$\%$ สำหรับ $\lambda$	= 633		
	FUIE Dario3	nm				
ค่าคงตัวการผสมคลื่น 2 ขบวน	10 – 40 cm <sup>-1</sup>					
การดูดกลื่นแสง	$\lambda$ (nm)	515	633	800		
(Absorption loss)	$oldsymbol{lpha}$ ( cm <sup>-1</sup> )	0.285	0.108	0.033		
ช่วงความยาวคลื่นแสงในการตอบสนอง	Undoped BTO : visible light					
ของผลึก (Wavelength range of	Ce : BTO	: 480-	780 nm			
photo refractive effect)	Rh : BTO	: 720-3	1060 nm			

**ตารางที่ 3.2** แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของผลึกแบเรียมไททาเนต

โครงสร้าหเอือ (Crystal structure)	tetragonal 4	m				
	10 °C ( 50 °F ) < T < 132 °C ( 269.6 °F )					
ช่วงการส่งผ่าน (Transmission range)	0.45 – 6.30	lm				
	$\lambda$ (nm)	515	633	800		
ดัชนีหักเหแสง (Refractive indices)	n <sub>0</sub>	2.4921	2.4160	2.3681		
	n <sub>e</sub>	2.4247	2.3630	2.3235		
ด่าสับประสิทธิ์อิเอ็กโทรออปติกส์	$r_{13}^{T} = 11.7 \pm$	1.9 pm/v				
(Electro optic coefficients)	$r_{33}^{T} = 112 \pm 10 \text{ pm/v}$					
	r <sup>T</sup> <sub>42</sub> = 1920 ± 180 pm/v					
	Reflectivity of SPPC (0° - cut)					
	50 – 70%	สำหรับ ว	Sauge 1 515			
คุณสมบัติโฟโตรีแฟรกทีฟ	(max: 77%)	6111307	, – 515 mi	I		
(Photorefractive properties)	50-80%					
	(max:	สำหรับ $\lambda$	สำหรับ <i>ג</i> = 633 nm			
	86.8%)					
ค่าคงตัวการผสมคลื่น 2 ขบวน						
(Two-wave mixing coupling	10 – 40 cm <sup>-1</sup>					
constant)						
การดูดกลื่นแสง	$\lambda$ (nm)	515	633	800		
(Absorption loss)	lpha ( cm <sup>-1</sup> )	3.392	0.268	0.005		

## **ตารางที่ 3.3** แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม

**หมายเหตุ** ช่วงการใช้งานของผลึกอยู่ระหว่างอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ถึง 120 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกัน การเปลี่ยนเฟสของผลึกเมื่อคลื่นแสงตกกระทบตัวกลาง และทำการขัดผิวหน้าผลึกในลักษณะต่าง ๆ เพื่อการ ใช้งานตามความเหมาะสม เช่น

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

- 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

สำหรับการทดลองเพื่อศึกษาการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงในผลึกแบเรียมไททาเนต ชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ทางแสงที่มีความละเอียดพอสมควร และในการติดตั้งชุดการ ทดลองต้องติดตั้งบนโต๊ะทดลองทางแสง (Isolate table) เพื่อลดการสั่นของระบบที่เกิดจากการรบกวนจาก สิ่งแวดล้อม เพราะระบบการทดลองทางแสงต้องการความนิ่ง ห้ามมีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นระหว่างทำการ ทดลอง และสิ่งสำคัญห้องปฏิบัติการทางแสงต้องเป็นห้องมืด เพื่อสามารถสังเกตลำแสงเลเซอร์ได้อย่างชัดเจน ไม่มีแสงรบกวนจากภายนอก ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลองมี ดังต่อไปนี้

## 3.2.1 อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกต ในผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือ ด้วยอะตอมซีเรียม ประกอบด้วย

- ผลีกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม (Ce : BaTiO<sub>3</sub>) มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ขนาด กว้าง 6 มิลลิเมตร ยาว 6 มิลลิเมตร และ สูง 6.5 มิลิเมตร (a x b x c) ตามลำดับ ซึ่ง ความสูง c เป็นแกนแสงของผลึก (c-axis)
- เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแสงสี แดง
- แผ่นโพลาไรเซอร์ (Polarizer) 2 แผ่น เนื่องจากเลเซอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นแสงไม่ โพลาไรซ์จึงต้องติดตั้งไว้ในชุดการทดลองนี้ด้วยเพื่อทำให้ลำแสงเลเซอร์กลายเป็นแสง โพลาไรซ์และอีก 1 แผ่น สำหรับเพื่อใช้ตรวจสอบแกนการโพลาไรซ์ของแสงตกกระทบ และ การโพลาไรซ์ของลำแสงต่าง ๆในการทดลอง
- 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 แต่ความเข้มแสงที่ถูกแยกจะลดลงครึ่งหนึ่ง ของแสงจากเลเซอร์

- กระจก (Mirror) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว ตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่น
   400 ถึง 750 นาโนเมตร ทำหน้าที่สะท้อนแสงในการศึกษาปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิง แสง
- ฉากรับแสง (Scene) ใช้กระดาษสีขาว ทำหน้าที่รับลำแสงเลี้ยวเบนจากผลึก เพื่อให้สามารถ สังเกตภาพ และสามารถบันทึกภาพได้ชัดเจน
- รางเลื่อน (Linear guide) ทำจากอลูมิเนียม ซึ่งสามารถเลื่อนในระนาบแกน x ได้ 15 เซนติเมตร และในระนาบแกน y ได้ 100 เซนติเมตร ทำหน้าที่เลื่อนผลึกเพื่อให้สามารถปรับ มุมตกกระทบแสงเลเซอร์ที่ผิวหน้าของผลึกได้ ในการหามุมตกกระทบ และสังเกตเห็นลำแสง ที่มีความเข้มมากที่สุด
- 8. แท่นวางผลึก (Stage) สูงประมาณ 15 เซนติเมตร จากพื้นโต๊ะทดลอง
- มิเตอร์วัดความเข้มแสงเลเซอร์ (Power meter) ใช้วัดความเข้มแสงของลำแสงตกกระทบ และลำแสงต่าง ๆในการทดลอง
- 10. แว่นกันแสงเลเซอร์ เพื่อป้องกันแสงเลเซอร์เข้าตาระหว่างทำการทดลอง
- 11. กล้องถ่ายภาพ (CCD) ใช้บันทึกภาพของลำแสงที่เกิดขึ้น
- 12. อุปกรณ์อื่น ๆ เช่น ชุดหกเหลี่ยม ชุดทำความสะอาดเลนส์ ไฟฉาย

## 3.2.2 การจัดระบบการทดลอง

ในการทดลองเพื่อศึกษาการเกิดปรากฏการเฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสง โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ตอน สำหรับเรโซเนเตอร์ชนิดที่ 1 และเรโซเนเตอร์ชนิดที่ 2 แผนภาพการจัดอุปกรณ์การทดลองแสดงในรูปที่ 3.5 สำหรับการทดลองโดยใช้เรโซเนเตอร์ชนิดที่ 1และการทดลองในรูปที่3.6สำหรับการทดลองโดยใช้เรโซเน เตอร์แบบที่ 2 โดยในการทดลองใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน (He-Ne laser) มีความยาวคลื่น 632.8นาโนเมตร เป็นแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งลำแสงจากเลเซอร์ (Light source) ถูกแยกเป็น 2 ลำที่มีแกนโพลาไรซ์เหมือนกับ ลำแสงเดิม โดยแสงลำที่ 1 ผ่านตัวแยกแสงไปตกกระทบที่ผิวหน้าของผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วย อะตอมซีเรียม และแสงลำที่ 2 หักเหออกจากตัวแยกแสงไปตกกระทบบนกระจก ซึ่งต้องหมุนตัวแยกแสง เพื่อให้แสงลำที่ 2 ทำมุม 90 องศากับลำแสงจากเลเซอร์เพื่อให้ลำแสงทั้ง 2 มีความเข้มแสงใกล้เคียงกันมาก ที่สุดเพื่อให้เหมาะสมต่อการเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟซึ่งเป็นปรากฏการณ์พื้นฐานที่ทำให้เกิด ปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสง ในการทดลองทั้งสองตอนจะใช้ลำแสงที่ 1 เพียงลำเดียวไปตกกระทบที่ ผิวหน้าของผลึกและปิดลำแสงที่ 2 ไว้ โดยจะต้องปรับให้ลำแสงไปตกกระทบกับผลึกด้วยมุมตกกระทบที่ เหมาะสมตามเงื่อนไขต่างๆจึงจะสามารถเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงขึ้นมาได้



รูปที่ 3.5 แสดงแผนภาพการจัดอุปกรณ์การทดลองสำหรับเรโซเนเตอร์แบบที่ 1



รูปที่ 3.6 แสดงแผนภาพการจัดอุปกรณ์การทดลองสำหรับเรโซเนเตอร์แบบที่ 2

## 3.3 ขั้นตอนการทดลองการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสง

ขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงตกกระทบในผลึกแบเรียม ไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม โดยมีวิธีการทดลองตามขั้นตอน ดังต่อไปนี้

- จัดอุปกรณ์การทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.5 และ 3.6 ซึ่งอุปกรณ์ทั้งหมดติดตั้งบนโต๊ะทดลองทางแสง เพื่อลดการรบกวนจากการสั่นสะเทือน และอุปกรณ์ทุกชิ้นต้องสะอาดปราศจากฝุ่นเพื่อลดการกระเจิง ของแสงเมื่อตกกระทบอุปกรณ์ และต้องทำการทดลองในห้องมืด
- ขั้นตอนการจัดอุปกรณ์การทดลองต้องปรับแนวการเดินทางของแสง (Alignment) ให้เป็นเชิงเส้นอยู่ ในระดับเดียวกันทั้งแกน × และ แกน z โดยปรับระดับของแท่นยึดตัวเลเซอร์ และสังเกตลำแสงที่ส่อง

ออกมาจากตัวเลเซอร์อยู่ในระดับเดียวกัน และต้องปรับให้ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบที่ตำแหน่งกลาง ของอุปกรณ์แต่ละชิ้น เพื่อลดการกระเจิงแสงที่ขอบของอุปกรณ์

- 3. ปรับลำแสงจากเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ให้ทิศการโพลาไรซ์ของแสงขนานกับแกนแสงของผลึก (c-axis) ตกกระทบตัวแยกแสง ลำแสงถูกแยกออกเป็น 2 ลำ โดยลำที่ 1 ผ่านตัวแยกแสงไปตกกระทบผลึก แบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม และแสงลำที่ 2 หักเหจากตัวแยกแสง หมุนตัวแยกแสง เพื่อให้แสงลำที่ 2 ทำมุม 90 องศา กับลำแสงจากตัวเลเซอร์ ไปตกกระทบบนกระจก ปรับกระจก เพื่อให้แสงลำที่ 2 สะท้อนไปตกกระทบและซ้อนทับกับแสงลำที่ 1 ตรงกลางผลึกพอดี เพื่อให้ เหมาะสมในการเกิดปรากฏการ์โฟโตรีแฟรกทีฟ
- ในการวางผลึกบนแท่นวาง ต้องจัดให้แกนแสงของผลึกอยู่ในระนาบแกน z และเลื่อนแท่นวางผลึกที่ ติดตั้งอยู่บนรางเลื่อน เพื่อปรับให้แสงเลเซอร์ตกกระทบที่ตำแหน่งกลางของผลึกพอดี โดยปรับราง เลื่อนในแกน x และปรับรางเลื่อนในแกน y เพื่อให้แสงทั้ง 2 ลำ ตกกระทบทำมุมที่เหมาะสมกับผลึก และเกิดลำแสงเลี้ยวเบนที่มีความเข้มแสงมากที่สุด
- ในการทดลองจะใช้ลำแสงลำที่ 1 เพียงลำเดียวที่ตกกระทบบนผลึก ปรับระยะด้วยรางเลื่อนในแกน y ต้องปรับรางเลื่อนในแกน x ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เพื่อให้แสงอยู่ตรงกลางผลึกพอดี เพราะเมื่อ เลื่อนตำแหน่งของผลึกไปทำให้มุมตกกระทบของลำแสงเปลี่ยนไป จากนั้นอ่านค่ามุมตกกระทบของ ลำแสง



**รูปที่ 3.7** แสดงการปรับระยะผลึกด้วยรางเลื่อนในแกน x และ แกน y

- บันทึกกำลังของลำแสง ณ ตำแหน่งต่างๆ ทำการจับเวลาเพื่อบันทึกเวลาในการเกิดปรากฏการณ์เฟส คอนจุเกชั่นเชิงแสงที่มุมตกกระทบต่างๆ
- 7. บันทึกภาพลำแสงจากปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงที่เกิดขึ้น ด้วยกล้องบันทึกภาพ CCD

- 8. ในการทดลองใช้แหล่งกำเนิดแสงสีแดง จากเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ความยาวคลื่นแสง 632.8 นาโน เมตร ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองจากเรโซเนเตอร์ต่างชนิดกัน
- นำผลการทดลองบันทึกลงในตารางบันทึกผล เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากเรโซเนเตอร์ทั้งสอง ชนิด
- นำผลการทดลองที่ได้ทั้งหมดมาวิเคราะห์ ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบที่กระทำกับผลึก พร้อม กับวิเคราะห์ค่า PC Reflectivity และเวลาในการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงของเรโซเน เตอร์ทั้งสองชนิด โดยเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับเลเซอร์สีเขียวที่มีการทดลองมาแล้ว

**หมายเหตุ :** ระหว่างการทดลองควรระวังลำแสงเลเซอร์เข้าตา ป้องกันโดยใช้แว่นตัดแสงเลเซอร์ และไม่ควรเปิดเลเซอร์ทิ้งไว้นานเกินไป หรือเมื่อใช้งานเสร็จแล้วควรปิดสวิตซ์ไฟ

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

### 4.1 มุมตกกระทบของลำแสงจากปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสง

จากการทดลองเพื่อศึกษาการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงในผลึกแบเรียมไททาเนตชนิด เจือด้วยอะตอมซีเรียม โดยใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออนเป็นแหล่งกำเนิดแสงสีแดงความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ซึ่งผลึกที่ใช้ในการทดลอง แสดงในรูปที่ 4.1 โดยรูป 4.1(ก) ยังไม่ส่องสว่างลำแสงตกกระทบผลึก สังเกตว่าผลึก มีลักษณะใสเป็นสีส้มเหลือง แต่เมื่อส่องสว่างลำแสง ตกกระทบผลึกด้วยมุมตกกระทบที่เหมาะสม จะ สังเกตเห็นว่าแสงจะมีการกระเจิงเต็มผลึก ดังแสดงในรูปที่ 4.1(ข)



(1)

**รูปที่ 4.1** แสดงผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม (Ce:BaTiO<sub>3</sub>) ที่ใช้ในการทดลอง

ก) เมื่อไม่มีแสงตกกระทบผลึก ข) เมื่อส่องสว่างลำแสงตกกระทบผลึก

เมื่อลำแสงตกกระทบผลึก ส่งผลให้อะตอมภายในผลึกถูกกระตุ้นจากลำแสงและเกิดการจัดเรียงตัวกัน ใหม่ ผลึกสามารถสร้างสนามที่ว่างประจุขึ้น (Space-charge field) แบบเป็นคาบตามแถบการแทรกสอดของ แสง เป็นสาเหตุให้ค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลางมีความแตกต่างกัน จากนั้นผลึกสามารถสร้างดัชนีเกรตติง (Index grating) ขึ้น เรียกว่าปรากฏการณ์โฟโตรีแฟรกทีฟ (Photorefractive effect) ถ้ามุมตกกระทบของ แสงเลเซอร์เหมาะสม เป็นไปตามเงื่อนไขการเลี้ยวเบนของแบรกก์ แสงจะเกิดการเลี้ยวเบนไปตกกระทบบน กระจกด้วยความเข้มแสงสูงที่สุดและสะท้อนกลับมาในแนวเดิมกับลำแสงตกกระทบ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์การ การเกิดคลื่นเฟสคอนจุเกตในผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์แบบทัศนศาสตร์ไม่เชิงเส้น โดยในการ ทดลองได้ทำการทดลองกับเรโซเนเตอร์หลายแบบ ซึ่งผลการทดลองพบว่ามีเรโซเนเตอร์ 2 ชนิดที่สามารถทำ ให้เกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงได้ โดยในการทดลองได้ทำการปรับมุมตกกระทบของลำแสงเลเซอร์ กับผลึก จนเกิดเป็นปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงและได้ลำแสงจากคลื่นเฟสคอนจุเกตที่มีความเข้มแสง มากที่สุด โดยในแต่ละแบบได้ทำการทดลอง 3 ครั้ง เพื่อหามุมตกกระทบเฉลี่ยของลำแสง ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2

จากตารางที่ 4.1 แสดงมุมตกกระทบของลำแสงเพื่อศึกษาลำแสงเลี้ยวเบนจากปรากฏการณ์เฟสคอนจุ เกชั่นเชิงแสงจากเรโซเนเตอร์แบบที่ 1โดยจัดการชุดทดลองดังรูปที่ 3.5 ในผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วย อะตอมซีเรียม โดยใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออนเป็นแหล่งกำเนิดแสงสีแดงความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ได้ผล การทดลองดังตาราง 4.1(ก),4.1(ข),4.1(ค) และ 4.1(ง) ซึ่งสามารถสังเกตลำแสงที่ตกกระทบบนฉากโดยมีกำลัง ทางแสงสูงสุดที่มุมตกกระทบเฉลี่ยเท่ากับ 37.23 องศา

จากนั้นในตารางที่ 4.2 ได้ทำการทดลองเหมือนเดิมแต่เปลี่ยนชนิดของเรโซเนเตอร์เป็นแบบที่ 2 โดย จัดการชุดทดลองดังรูปที่ 3.6 เพื่อศึกษาลำแสงเลี้ยวเบนจากปรากฏการณ์การเฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสง ได้ผล การทดลองดังตาราง 4.2(ก),4.2(ข),4.2(ค) และ 4.2(ง)ซึ่งสามารถสังเกตลำแสงที่ตกกระทบบนฉากโดยมีกำลัง ทางแสงสูงสุดที่มุมตกกระทบเฉลี่ยเท่ากับ 37.44องศา

$ heta_i$	P <sub>0</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>o1</sub>	P <sub>o2</sub>	PC	PC Reflectivity
(degree)	(mW)	(mW)	(mW)	(µW)	(µW)	Output	× 10 <sup>-3</sup>
						$(\mu W)$	
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

	المعربين مستعرب من معرف من مع	100000000000000000000000000000000000000
0151111 4.1(h)	แสดงที่ทดแบวะแกดองยุ่งแหลงเตอเอเวเอเทเตอวแกกณ	11.124161963612441 1

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

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 1การทดลองครั้งที่ 2

$ heta_i$	P <sub>0</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>o1</sub>	P <sub>o2</sub>	PC Output	PC Reflectivity
(degree)	(mW)	(mW)	(mW)	(µW)	$(\mu W)$	( <b>µW</b> )	× 10 <sup>-3</sup>
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

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

$\theta_{i}$	P <sub>0</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>o1</sub>	P <sub>o2</sub>	PC Output	PC Reflectivity
(degree)	(mW)	(mW)	(mW)	(µW)	$(\mu W)$	(µW)	× 10 <sup>-3</sup>
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

ตารางที่ 4.1(ค) แสดงมุมตกกระทบของลำแสงโดยใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 1การทดลองครั้งที่ 3

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

$ heta_i$	P <sub>0</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>01</sub>	P <sub>02</sub>	PC Output	PC Reflectivity
(degree)	(mW)	(mW)	(mW)	(µW)	(µW)	(µW)	× 10 <sup>-3</sup>
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

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

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 จากกราฟจะเห็นว่า ในการทดลองครั้งที่ 1, 2 และ 3 มุมตกกระทบที่สามารถเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงได้ดีที่สุดโดย มีค่า PC Reflectivity มากที่สุด คือที่มุม 37.11 องศา 37.44 องศาและ 37.15 องศา โดยมีค่าเท่ากับ 5.291 × 10<sup>-3</sup>, 5.487 × 10<sup>-3</sup> และ 5.358 × 10<sup>-3</sup> ตามลำดับ โดยความสัมพันธ์ระหว่างมุมตก กระทบกับค่า PC output แสดงได้ดังรูปที่ 4.3 โดยในการทดลองครั้งที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 0.46 μW, 0.48 μW และ 0.47 μW ตามลำดับ

จากการทดลองใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 1โดยทำการทดลอง 3 ครั้ง ผลการทดลองที่ได้ในแต่ละครั้งมี ความใกล้เคียงกันมาก โดยมุมตกกระทบที่สามารถเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงได้ดีและมีกำลังของ แสงมากที่สุด คือ ที่มุมตกกระทบเฉลี่ย 37.23 องศา โดยมีค่า PC Reflectivity มากที่สุดเฉลี่ยเท่ากับ  $5.379 \times 10^{-3}$  และค่า PC output เฉลี่ยเท่ากับ 0.47  $\mu$ W



ร**ูปที่ 4.2** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า PC Reflectivity กับมุมตกกระทบของลำแสงโดยใช้ เรโซเนเตอร์แบบที่ 1จากรูป ก), ข), ค) และ ง) คือกราฟผลการทดลองจากตารางที่4.1(ก), 4.1(ข),4.1(ค) และ 4.1(ง) ตามลำดับ



ร**ูปที่ 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

$ heta_i$	P <sub>0</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>o1</sub>	P <sub>o2</sub>	PC	PC
(degree)	(mW)	(mW)	(mW)	(mW)	(mW)	Output	Reflectivity
						(mW)	
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

ตารางที่ 4.2(ก) แสดงมุมตกกระทบของลำแสงโดยใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 2 การทดลองครั้งที่ 1

$ heta_i$	P <sub>0</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>o1</sub>	P <sub>o2</sub>	PC	PC
(degree)	(µW)	(µW)	(µW)	(µW)	(µW)	Output	Reflectivity
						$(\mu W)$	
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

**ตารางที่ 4.2(ข)** แสดงมุมตกกระทบของลำแสงโดยใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 2 การทดลองครั้งที่ 2

$ heta_i$	P <sub>0</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>o1</sub>	P <sub>o2</sub>	PC	PC
(degree)	(mW)	(mW)	(mW)	(mW)	(mW)	Output	Reflectivity
						(mW)	
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

ตารางที่ 4.2(ค) แสดงมุมตกกระทบของลำแสงโดยใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 2 การทดลองครั้งที่ 3

$ heta_i$	P <sub>0</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>o1</sub>	P <sub>o2</sub>	PC	PC
(degree)	(mW)	(mW)	(mW)	(mW)	(mW)	Output	Reflectivity
						(mW)	
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

ตารางที่ 4.2(ง) แสดงมุมตกกระทบของลำแสงโดยใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 2 ค่าเฉลี่ย

## จากตารางที่ 4.1 และ 4.2

- กำหนดให้ Po คือ กำลังทางแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน
  - P1 คือ กำลังทางแสงที่ผ่านตัวแยกแสง ก่อนเข้าผลึก
  - P2 คือ กำลังทางแสงที่ออกจากผลึก

### Po1 คือ กำลังทางแสงที่สะท้อนกลับมา วัดขณะเริ่มต้นการทดลอง ณ มุมนั้นๆ

Po2 คือ กำลังทางแสงที่สะท้อนกลับมาเป็นลำแสงจากปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่น เชิงแสง วัดขณะที่ได้กำลังทางแสงสูงสุดสำหรับการทดลอง ณ มุมนั้นๆ

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

ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบกับค่า PC Reflectivity แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 จากกราฟจะเห็นว่า ในการทดลองครั้งที่ 1, 2 และ 3 มุมตกกระทบที่สามารถเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงได้ดีที่สุดโดย มีค่า PC Reflectivity มากที่สุด คือที่มุม 37.54 องศา 37.11 องศาและ 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 2โดยทำการทดลอง 3 ครั้ง ผลการทดลองที่ได้ในแต่ละครั้งมี ความใกล้เคียงกันมาก โดยมุมตกกระทบที่สามารถเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงได้ดีและมีกำลังของ แสงมากที่สุด คือ ที่มุมตกกระทบเฉลี่ย 37.44 องศา โดยมีค่า PC Reflectivity มากที่สุดเฉลี่ยเท่ากับ 0.240 และค่า PC output เฉลี่ยเท่ากับ 0.021 **mW** 

จากผลการทดลองจากตารางที่ 4.1 และ 4.2 จะเห็นว่ามุมตกกระทบที่ดีที่สุดของลำแสงในการเกิด ปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงสำหรับเรโซเนเตอร์ทั้งสองชนิด มีความแตกต่างกันเพียง 0.21 องศา แสดงว่ามุมตกกระทบในช่วงมุมเฉลี่ย 37 องศา เป็นมุมตกกระทบที่เหมาะสมต่อการเกิดปรากฏการณ์เพราะ สามารถสร้างคลื่นเฟสคอนจุเกตได้กับทั้งเรโซเนเตอร์ทั้งสองชนิด แต่จากการทดลองจะเห็นว่าชนิดของเรโซเน เตอร์นั้นมีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงโดยจากการทดลองจะเห็นว่าเมื่อทดลองโดยใช้เร โซเนเตอร์แบบที่ 1 จะได้กำลังทางแสงจากลำแสงของคลื่นเฟสคอนจุเกตน้อยกว่าเมื่อทดลองกับเรโซเนเตอร์ แบบที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบจากมุมที่ดีที่สุดในการเกิดปรากฏการณ์ของเรโซเนเตอร์ทั้งสองชนิด

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อทดลองด้วยเรโซเนเตอร์ต่างชนิดกัน เรโซเนเตอร์แบบที่ 1 จะทำให้เกิด ปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงโดยมีกำลังทางแสงน้อยกว่าเรโซเนเตอร์แบบที่ 2 เนื่องจากเรโซเนเตอร์ช นิดที่ 1 นั้นเมื่อมีแสงตกกระทบผลึก แสงบางส่วนจะมีการกระเจิง ทำให้แสงที่เหลือสำหรับใช้ในการเกิด ปรากฏการณ์ลดลงแต่สำหรับเรโซเนเตอร์ชนิดที่ 2 เนื่องจากการใส่กระจกเข้าไปตรงด้านหลังของผลึก กระจก จะช่วยสะท้อนลำแสงให้กลับเข้ามาในผลึกทำให้มีปริมาณของแสงเพิ่มมากขึ้นสำหรับใช้ในการเกิด ปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสง



**รูปที่ 4.4** กราฟแสดงความสัมพันธ์ PC Reflectivity กับมุมตกกระทบของลำแสง โดยใช้เรโซเน เตอร์แบบที่ 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 กับมุมตกกระทบของลำแสงโดยใช้เร โซเนเตอร์แบบที่ 2 จากกราฟ ก) , ข), ค) และ ง) คือกราฟผลการทดลองจากตารางที่ 4.2 (ก), 4.2(ข),4.1(ค) และ 4.2(ง) ตามลำดับ

# **ตารางที่ 4.3** แสดงเวลาในการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงที่มุมเฉลี่ย 37.23 องศา จาก

# เรโซเนเตอร์ ชนิดที่ 1

เวลา	P <sub>o2</sub> /ครั้งที่1	P <sub>o2</sub> /ครั้งที่2	P <sub>o2</sub> /ครั้งที่3	P <sub>o2</sub> /เฉลี่ย	PC Output	PC
(	()	()	()	()	$(\mu W)$	Reflectivity
(นาท)	(µw)	(µw)	(µw)	(μνν)		$\times 10^{-3}$
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

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

# **ตารางที่ 4.4** แสดงเวลาในการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสง ที่มุมเฉลี่ย 37.44 องศา

## จากเรโซเนเตอร์ชนิดที่ 2

เวลา	P <sub>o2</sub> /ครั้งที่1	P <sub>o2</sub> /ครั้งที่2	P <sub>o2</sub> /ครั้งที่3	P <sub>o2</sub> /เฉลี่ย	PC Output	PC
(นาที)	(mW)	(mW)	(mW)	(mW)	(mW)	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

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

จากผลการทดลองจากตารางที่ 4.3 และ 4.4 ทำการจับเวลาเพื่อเปรียบเทียบเวลาในการเกิด ปรากฏการณ์จากเรโซเนเตอร์ทั้งสองชนิดโดยทดลองกับมุมที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ดีที่สุดและมีกำลังทางแสง มากที่สุด ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับค่า PC Output แสดงได้ดังรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าเวลาในการ เกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงของเรโซเนเตอร์ชนิดที่1จะใช้เวลาในการเกิดปรากฏการณ์จนมีกำลัง ทางแสงมากที่สุดนั้นนานกว่าเรโซเนเตอร์ชนิดที่ 2 คือ 17 นาทีและ 15 นาที ตามลำดับ และจากกราฟ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบกับค่า PC Reflectivity ที่ได้จากการทดลอง



ร**ูปที่ 4.6** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเกิดปรากฏการณ์กับค่า PC Output ก) จาก เรโซเนเตอร์ชนิดที่ 1 และ ข) จากเรโซเนเตอร์ชนิดที่ 2



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเกิดปรากฏการณ์กับค่า PC Reflectivity

ก) จากเรโซเนเตอร์ชนิดที่ 1 และ ข) จากเรโซเนเตอร์ชนิดที่ 2

### 4.2 ภาพลำแสงของปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสง

ภาพของลำแสงสะท้อนจากปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงสามารถสังเกตได้บนฉากรับแสง ที่ วางอยู่ตรงด้านข้างของ beam splitter และบันทึกภาพโดยใช้กล้อง CCD ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งเป็นภาพ แสดงลำแสงสะท้อนจากปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงจากการทดลองโดยใช้เรโซเนเตอร์แบบที่ 1 และ รูปที่ 4.9 จากเรโซเนเตอร์แบบที่ 2 โดยเป็นภาพที่บันทึกจากการทดลองครั้งที่ 1, 2 และ 3 จากมุมที่เกิด ปรากฏการณ์ดีที่สุดและมีกำลังทางแสงมากที่สุด



ร**ูปที่ 4.8** แสดงลำแสงจากปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงโดยเรโซเนเตอร์แบบที่ 1 จากตาราง ที่ 4.1 (ก),4.1(ข) และ 4.1(ค) จากมุมที่เกิดปรากฏการณ์ดีที่สุดและมีกำลังทางแสงมากที่สุด ก)ที่มุม 37.11 องศา ข) ที่มุม 37.44 องศา ค) ที่มุม 37.15 องศา วัดกำลังทางแสงที่ออกมา ได้ 0.46 nW,0.48 nW และ 0.47nW ตามลำดับ



**รูปที่ 4.9** แสดงลำแสงจากปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงโดยเรโซเนเตอร์แบบที่ 2 จากตาราง ที่ 4.2 (ก),4.2 (ข) และ 4.2(ค) จากมุมที่เกิดปรากฏการณ์ดีที่สุดและมีกำลังทางแสงมากที่สุด ก) ที่มุม 37.54 องศา ข) ที่มุม 37.11 องศา ค) ที่มุม 37.66 องศา วัดกำลังทางแสงที่ออกมา ได้ 0.021 μW, 0.023 μW และ 0.019 μW ตามลำดับ

เมื่อมีเมื่อแสงตกกระทบผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียม แสงจะกระเจิงภายในผลึก และแทรกสอดกันเกิดเป็นแถบมืดแถบสว่าง ทำให้อะตอมภายในผลึกเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ตามแถบการแทรก สอดที่เกิดขึ้น จากนั้นเกิดสนามไฟฟ้าที่ว่างประจุขึ้น และเกิดการสร้างเกรตติงขึ้นภายในผลึกตามทิศของ สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เปรียบเสมือนสลิตช่องเล็ก ๆ ทำให้ค่าดัชนีหักเหภายในผลึกแต่ละแกนเปลี่ยนแปลง เมื่อ แสงตกกระทบจะส่งผ่านพลังงานซึ่งกันและกัน จะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของแสงผ่านช่องสลิตเล็ก ๆ ของเกรต ดิงที่ถูกสร้างขึ้น ถ้ามุมตกกระทบของแสงเลเซอร์เหมาะสมเป็นไปตามเงื่อนไขการเลี้ยวเบนของแบรกก์ แสงจะ เกิดการสะท้อนกลับในแนวเดียวกับลำแสงตกกระทบด้วยความเข้มแสงมากที่สุดซึ่งเป็นปรากฏการณ์การเฟส คอนจุเกชั่นเชิงแสงในผลึกโฟโตรีแฟรกทีฟ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์แบบทัศนศาสตร์ไม่เชิงเส้น



**รูปที่ 4.10** แสดงลำแสงจากปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงโดยเรโซเนเตอร์แบบที่ 1 จากตารางที่ 4.3 ที่มุมเฉลี่ย 37.23 องศา

		-	-
า นาที	3 <b>บ</b> าที	ร บาที	7 นาที
-	-		
s บาที	10 UIN	12 <b>น</b> าที	13 <b>น</b> าที
	-		
14 <b>น</b> าที	<u>าร นาพี</u>	17 <b>บาท</b> ี	20 UIN
-			-
23 <b>นา</b> ที	25 <b>น</b> าที	27 <b>บ</b> าที	30 <b>บ</b> าที

**รูปที่ 4.11** แสดงลำแสงจากปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงโดยเรโซเนเตอร์ชนิดที่2 จาก ตารางที่ 4.4 ที่มุมเฉลี่ย 37.44 องศา

# บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากงานวิจัยที่ผ่านมาในการทดลองเพื่อศึกษาการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงด้วยเลเซอร์ สีเขียว ทำการทดลองกับผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดที่ไม่ได้เติมอะตอมของสารเจือพบว่าในการเกิด ปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงเป็นไปได้ยาก จึงมีการทดลองเจืออะตอมสารเจือหลายชนิดลงใน สารประกอบ BaTiO<sub>3</sub> ซึ่งสารเจือที่ได้รับความนิยมมาก คือ ซีเรียม (Ce) โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมามีการนำ ผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียมขนาด 6.15 mm×5.20 mm×8.20 mm

มาใช้ในการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงด้วยเลเซอร์อาร์กอน ความยาวคลื่น 514.5 nm แสงสีเขียว ผลการทดลองพบว่าสามารถเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงได้เร็วและดี โดยใช้เวลาใน การเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่นเชิงแสงจนมีความเข้มแสงมากที่สุดเพียง 250 วินาทีและมีค่า PC Reflectivity มากที่สุดเท่ากับ 1.25% เนื่องจากระดับพลังงานของซีเรียมในแถบพลังงานในผลีกแบเรียมไททา เนตนั้นเหมาะสมกับความยาวคลื่นของแสงสีเขียวจึงทำให้เกิดปรากฏการณ์ได้ในเวลารวดเร็วและเห็น ปรากฏการณ์ได้อย่างชัดเจน แต่สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาการเกิดปรากฏการณ์เงสคอนจุ เกชั่นเชิงแสงในผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียมโดยเลเซอร์ที่ใช้คือเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน แสง สีแดงความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ผลการทดลองที่ได้นั้นพบว่าสามารถเกิดปรากฏการณ์เฟสคอนจุเกชั่น เชิงแสงได้เช่นเดียวกัน แต่เกิดปรากฏการณ์ค่อนข้างยาก ใช้เวลาในการเกิดปรากฏการณ์นาน เมื่อเปรียบเทียบ กับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ทดลองด้วยแสงสีเขียว แต่ที่ยังสามารถเกิดปรากฏการณ์ได้นั้นไม่ได้หมายความว่าระดับ พลังงานของซีเรียมจะพอดีกับแสงสีเขียวหรือเหมาะสมกับแสงสีเขียวเท่านั้น โดยระดับพลังงานของซีเรียมนั้น อาจจะเหมาะสมกับทั้งแสงสีเขียวและแสงสีแดง แต่ถ้าเปรียบเทียบในแง่ของความน่าจะเป็นของการเกิด ปรากฏการณ์ แสงสีเขียวน่าจะมีโอกาสที่จะทำให้ทำให้อิเล็กตรอนสามารถถูกกระตุ้นขึ้นไปบนแถบนำกระแส ได้มากกว่ากว่าแสงสีแดง

โดยการเติมสารเจือของซีเรียมเข้าไปนั้นช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์อิเล็กโทรออปติกส์ อัตราการดูดกลืน แสงที่เพิ่มขึ้น การคับปลิงแสงมากขึ้น และการเหนี่ยวนำแสงเข้าใกล้ความเป็นเชิงเส้นมากขึ้น โดยสารเจือแต่ ละชนิดที่เติมลงในผลึก จะมีลักษณะของแถบพลังงานที่แตกต่างกัน ผลึกแบเรียมไททาเนตที่ไม่ได้เจือด้วย อะตอมของสารเจือมีช่องว่างพลังงานหรือ  $E_g = 3.2 \text{ eV}$  โดยสารเจือซีเรียมที่เติมลงไปนั้น เรียกว่า สารเจือ ผู้ให้ (donor impurity) ทุกๆสารเจือที่เติมเข้าไปจะให้อิเล็กตรอนอิสระหนึ่งตัว ทำให้เกิดระดับพลังงานใน ช่องว่างของแถบพลังงาน โดยระดับพลังงานของผู้ให้ อยู่เหนือแถบวาเลนซ์ประมาณ 2.4 eV สารเจือซีเรียมนี้ สามารถแตกตัวเป็นไอออนได้เนื่องจากการดูดกลืนโฟตอนจากแสงที่ตกกระทบตัวกลางและการแตกตัวเป็น ไอออนทำให้อิเล็กตรอนสามารถถูกกระตุ้นขึ้นไปบนแถบนำกระแสได้ง่ายกว่าในกรณีที่ไม่ได้เติมอะตอมของ สารเจือซีเรียมในผลึก BaTiO<sub>3</sub>

ดังนั้นจึงต้องเติมสารเจือซึ่งใช้พลังงานในการกระตุ้นต่ำ ๆ เพื่อขยายช่วงการตอบสนองต่อความยาว คลื่นแสงที่กว้างขึ้น จึงมีการทดลองเจืออะตอมสารเจือหลายชนิดลงในสารประกอบ **BaTiO**<sub>3</sub> เช่น Fe, Co, Ce, และ Rh ถึงแม้ผลึก **BaTiO**<sub>3</sub> ชนิดเจือด้วย Fe ไม่มีความสำคัญต่อการพัฒนาประสิทธิภาพของผลึกโฟโต รีแฟรกทีฟ แต่สามารถเพิ่มความเป็นวัสดุโฟโตรีแฟรกทีฟของผลึก **BaTiO**<sub>3</sub> 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 LiNbO3 and LiTaO3," 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, NewYork,

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงงานวิจัย



#### แบบรายงานการใช้จ่ายเงินโครงการวิจัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 4 รอบ 12 เดือน ประจำปังบประมาณ <u>2557</u>.

🗌 แหล่งงบประมาณแผนดิน (แบบปกต) 🗌 แหล่งเงินรายได้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) เฟสคอนจุเกตจากผลึกแบเรียมไททาเนตชนิดเจือด้วยอะตอมซีเรียมที่ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร

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

ชื่อ-สกุลหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน/ผู้วิจัย <u>อ.ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง</u>

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ ตุ<u>ลาคม 2556 ถึงวันที่ กันยายน 2557</u>

ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี เดือน ตั้งแต่วันที่ ตุลาคม 2556 ถึงวันที่ กันยายน 2557

ข้อมูลการรายงานค่าใช้จ่ายงบประมาณโครงการวิจัย

- 1. การเบิกจ่ายงบประมาณ (กรณีการจ่ายเงินถ้าจ่ายงวดเดียวให้ลบข้อที่ไม่เกี่ยวข้องออก)
- งวดที่ 1 <u>50,000</u> บาท <u>100</u> % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ด/ว)

3.

สรุปงบประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้นับตั้งแต่เริ่มทำการวิจัยถึงปัจจุบัน (จำแนกตามหมวดค่าใช้จ่าย)

หมวดค่าใช้จ่าย	งบประมาณรวม	ค่าใช้จ่าย (บาท)	คงเหลือ
	ทั้งโครงการ		(หรือเกิน)
งบบุคลากร:ค่าจ้างชั่วคราว		5,000	
งบดำเนินงาน			
ค่าตอบแทน			
ค่าใช้สอย	3,000	3,000	0
ค่าวัสดุ	42,000	42,000	0
ค่าสาธารณูปโภค			
งบลงทุน: ค่าครุภัณฑ์			
รวม	50,000	50,000	50,000

ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

ลงนามเจ้าหน้าที่การเงิน/เจ้าหน้าที่ที่กี่ยวข้อง

หมายเหตุ : นักวิจัยหรือเจ้าหน้าการเงินสามารถปรับหรือเปลี่ยนแปลงเพิ่มเติมข้อความได้ตามความเหมาะสมและสอดคล้องกับการ ดำเนินงาน อาทิเช่น นักวิจัยอยู่ระหว่างการดำเนินการเคลียร์ด้านเอกสารทางการเงิน หรือข้อความอื่นๆ ข้อมูลประวัติผู้วิจัย

Name : Mr Thammarat Taengtang

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.

#### 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.