รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การเปลี่ยนความยาวคลื่นของตัวแยกช่องสัญญาณสำหรับผู้ใช้หลายผู้ใช้โดยการเข้ารหัสควันตัมกับเครือข่าย

A novel continuous variable wavelength router for multi-user quantum key distribution network

โดย ดร. นิธิโรจจน์ พรสุวรรณเจริญ

มีนาคม พ.ศ. 2554

สัญญาเลขที่ TRG 5280022

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเปลี่ยนความยาวคลื่นของตัวแยกช่องสัญญาณสำหรับผู้ใช้หลายผู้ใช้โดยการเข้ารหัสควันตัมกับเครือข่าย

ผู้วิจัย ดร.นิธิโรจน์ พรสุวรรณเจริญ
สังกัด มหาวิทยัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

Abstract

Project Code: TRG 5280022

Project Title: A novel continuous variable wavelength router for multi-user quantum key distribution network

Investigator: Dr. Nithiroth Pornsuwancharoen
Rajamangala University of Technology Isan Sakhon-Nakon Campus

E-mail Address: jeewuttinun@gmail.com

Project Period: 2 years

We propose a new optical system that can be used to form the multi soliton pulses within the micro ring resonators. The system consists of two micro ring resonators and an add/drop multiplexer that can be integrated into a single system. The large bandwidth signal is generated by using a soliton pulse propagating in a Kerr type nonlinear medium. The tuned soliton pulses in either spatial or temporal modes are obtained by using the add/drop multiplexer. Results obtained have shown that the multi soliton pulses can be localized coherently within the micro ring waveguide. This is shown that the generation of the multi soliton pulses within the micro ring resonator is achieved, which is available for long distance communication with dense wavelength division multiplexing (DWDM). A significant increase in channel number and spacing is obtained, and the large free spectrum range (FSR) of 600 pm is achieved. In the near future the optical system by microring resonator can be design on chip in mobile phone.

Keywords: DWDM; Localized soliton; Multi soliton; Optical filter; Optical memory

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: TRG 5280022

ชื่อโครงการ: การเปลี่ยนความยาวคลื่นของตัวแยกช่องสัญญาณสำหรับผู้ใช้หลายผู้ใช้โดยการเข้ารหัสควันตัมกับเครือข่าย

ชื่อนักวิจัย: ดร. นิธิโรจน์ พรสุวรรณเจริญ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร

E-mail Address: jeewuttinun@gmail.com

ระยะเวลาโครงการ: 2 ปี

เรานำเสนอเรื่องการออกแบบระบบแสงที่สามารถใช้ในรูปแบบพัลส์โซลิตอนหลายช่องสัญญาณโดยใช้อุปกรณ์แยกแสงแบบโพงสั่งพ้องวงแหวนขนาดเล็กระดับไมโครเมตร ซึ่งการออกแบบอุปกรณ์จะประกอบด้วยอุปกรณ์แยกแสงแบบโพงสั่งพ้องวงแหวนขนาดเล็ก 2 ตัว และ อุปกรณ์แยกแสงแบบโพงสั่งพ้องวงแหวนขนาดเล็กแบบ 2 ทางที่สามารถรวมอยู่ในระบบเดียวกัน สัญญาณแบนด์วิดธ์ที่มีขนาดใหญ่จะถูกสร้างขึ้นโดยใช้สัญญาณขาเข้าเป็นสัญญาณแสงแบบโซลิตอน ซึ่งแสงโซลิตอนจะเดินทางผ่านอุปกรณ์แยกแสง เราได้ขนาดของช่องสัญญาณที่มากมาย (Large bandwidth signal) ซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์ ***เคอร์*** ที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Kerr type nonlinear medium). เราสามารถควบคุมการเกิดปรากฏการณ์ ดังกล่าวได้โดย ปรับค่าความยาวของรัศมีของอุปกรณ์โพงสั่นพ้อง หรือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของอุปกรณ์โพงสั่นพ้อง จากผมลการทดลองแสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์ของแสงที่สามารถแยกได้หลายความยาวคลื่น จากความสำเร็จเราสามารถออกแบบแสงให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการสื่อสารทางแสงแบบหลายช่องสัญญาณได้ (Dense Wavelength Division Multiplexing: DWDM) ซึ่งในแต่ละช่องสัญญาณมีความกว้างของพัลส์ที่ 600 พิโกเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นแบบหลายช่องสัญญาณที่เล็กมากในซึ่งในงานวิจัยในอนาคตอาจถูกออกแบบให้อยู่ในอุปกรณ์วงจรรวมที่อยู่ในโทรศัพท์มือถือก็เป็นได้

คำหลัก : DWDM; Localized soliton; Multi soliton; Optical filter;

สารบัญ

หัวข้อ	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	**1**
ความเป็นมาและความสำคัญ	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น	**3**
คุณสมบัติของแสงในเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว	3
ความไม่เป็นเชิงเส้นในใยแก้วนำแสง	6
ฟิสิกส์ของการเดินทางของพัลส์แสง	8
หลักการของแฟบริ-เฟอโรต์และโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวน	10
Field Enhancement	13
All-Pass or Phase Filter	14
ไบสเตบิลิตีเชิงแสง	15
สิ่งประดิษฐ์ออปติคัลไบสเตเบิล	21
พลวัตแบบไม่เป็นเชิงเส้นและเคออส	26
โครงสร้างโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสง	28
การเข้ารหัสแสงแบบควอนตัม	30
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	**32**
การศึกษาโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงโดยใช้แบบจำลอง... ทางคณิตศาสตร์	32
การศึกษาผลของดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์... แบบไม่เป็นเชิงเส้น	36
การศึกษาผลของดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่มีผลต่อการเกิดสวิตชิงกำลังแสง	36
การศึกษาผลของการเปลี่ยนเฟสแบบเชิงเส้นที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น	36
การศึกษาผลของอัตราส่วนการคัปปลิงกำลังแสงที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น	36
การศึกษาผลของความยาวของวงแหวนที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น	37

สารบัญ (ต่อ)

หัวข้อ หน้า

บทที่ 4 ผลการจำลองการวิจัย 38

เอาท์พุตกำลังแสงในระบบโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสง 38

ผลของดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบ... ไม่เป็นเชิงเส้น 43

ผลของการเกิดสวิตซิงกำลังแสงเมื่อค่าดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพิ่มขึ้น 55

ผลการทดลองของอุปกรณ์ตัวแยกความยาวคลื่นแบบหลาย ความยาวคลื่นแบบ... วงแหวนที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น 56

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 66

สรุปเอาท์พุตกำลังแสงในระบบโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสง 66

สรุปผลของดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบ... ไม่เป็นเชิงเส้น 66

สรุปผลของการเกิดสวิตซิงกำลังแสงเมื่อค่าดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพิ่มขึ้น 66

สรุปตัวแยกสัญญาณแสงแบบหลายช่องสัญญาณ 67

ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาต่อไป 67

เอกสารอ้างอิง 68

ภาคผนวก 71

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เป็นความสำคัญอย่างยิ่งที่ต้องทำความเข้าใจในเรื่องคุณสมบัติของเส้นใยแก้วนำแสง และทั้งแบบเป็นเชิงเส้น และแบบไม่เป็นเชิงเส้น เข้าใจเรื่องคุณสมบัติพื้นฐานของเส้นใยแก้วนำแสง เช่น การสูญเสียทางแสง (Optical loss) การกระจายแสง (Chromatic dispersion) การแยกแสง (Birefringence) การลดทอนแบบพิเศษ คือ การแยกแสง (Chromatic dispersion) เพราะ เป็นข้อสำคัญของการเรียนรู้ทางแสงทั้งแบบเป็นเชิงเส้น และแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยอาจใช้พัลส์ที่แคบมากๆ (Ultra short optical pulses) ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ของเส้นใยแก้วนำแสงที่เป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น จากความเข้มแสงที่เป็นอิสระ(Intensity dependence) ของ ดัชนีหักเหของวัสดุ และ การจำลองผลในการกระจายแสงที่เป็นแบบไม่ยืดหยุ่น(Inelastic scattering) ปรากฏการณ์ที่เป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้นสามารถเรียนรู้โดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงที่เป็นวัสดุแบบเป็นเชิงเส้น (Nonlinear medium) คือ การรวมสัญญาณแบบเฟสร่วม(self-phase modulation) การรวมสัญญาณแบบทแยง(Cross-phase modulation) การรวมกันแบบหลายความยาวคลื่น (Four-wave mixing) การกระจายโดยวิธีของ รามาน (Stimulated Raman scattering) และ การกระจายโดยวิธีของ บิลเลียน(Stimulated Brillouin scattering)

ความเป็นมาของเส้นใยแก้วนำแสง เริ่มต้นจากการสะท้อนภายในของแสง(internal reflection) เป็นปรากฏการณ์พื้นฐานที่เกิดขึ้นในเส้นใยแก้วนำแสงตั้งแต่ศตวรรษที่ 19 มีการบันทึกไว้ในหนังสือปี ค.ศ. 1999 เป็นที่น่าสนใจในการค้นพบปรากฏการณ์ดังกล่าว [1] และในปี ค.ศ. 1920 [2]-[4] มีการคิดค้น และ การส่งแสงผ่านเส้นใยแก้วนำแสงแบบไม่มีฉนวนหุ้ม (Uncladed glass fibers) ขึ้น ไม่มีการค้นสนามแม่เหล็กในเส้นใยแก้วนำแสงจนกระทั่งปี ค.ศ. 1950 เมื่อมีการใช้ชั้นฉนวนหุ้ม (Cladding layer) ซึ่งมีผลทำให้คุณสมบัติของเส้นใยแก้วนำแสงดีขึ้น [5]-[8] ในทางอุดมคติเส้นใยแก้วนำแสงมีประโยชน์มากเมื่อมีการค้นพบฉนวนหุ้มเส้นใย (Dielectric cladding) ซึ่งไม่ได้ระบบไว้ในประวัติที่ผ่านมา[1] การสื่อสารทางแสงในเส้นใยแก้วนำแสงได้ถูกพัฒนาอย่างรวดเร็วในปี ค.ศ. 1960 ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์ในทางจินตนาภาพในการส่งสัญญาณ(Image transmission) ผ่านไปยังเส้นใยแก้วนำแสง[9] เมื่อค้นพบว่าที่ปลายสุดของเส้นใยแก้วนำแสงเกิดการสูญเสียเกือบทั้งหมด (loss >1000 dB/km) และเป็นมาตรฐานถึงปัจจุบัน (Modern standard) อย่างไรก็ตาม ก็มีการเปลี่ยนแปลงครั้งใหญ่ ในปี ค.ศ. 1970 เมื่อมีข้อสังเกตใหม่ที่ทำให้เห็นได้ว่า [10] การสูญเสียในเส้นใยแก้วนำแสงที่สร้างโดยซิลิกาต่ำกว่า 20 dB/km [11] และมีการสร้างขึ้นต่อเนื่อง [12] ซึ่งเป็นผลการทดลองครั้งใหม่พบในปี ค.ศ. 1979 ว่ามีการสูญเสียในเส้นใยแก้วในแสงเพียงแค่ 0.2 dB/km ที่ความยาวคลื่น 1.55 μm [13] เป็นค่าที่เ)นระดับการสูญเสียที่เป็นค่าที่

ยอมรับจนถึงปัจจุบัน ซึ่งมีการพัฒนาอุปกรณ์ทันสมัยอย่างมากมีนักวิทยาสาสตร์ หลายคนที่พยามหาทางเลือกในการสื่อสารทางแสง แบบแสงมืด (Dark soliton) มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

ดังนั้น ไม่ง่ายนักที่เราสามารถนำคุณสมบัติที่ดีหลายประการของการสื่อสารทางแสงในข้างต้นนำมาประยุกต์สร้างองค์ความรู้ใหม่ ให้เกิดประโยชน์จากการใช้คุณสมบัติของแสงมาประยุกต์ในการสื่อสารข้อมูล และอีกทั้งเกิดประโยชน์กับการสื่อสารทางแสงด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. สร้างอุปกรณ์ทางแสงไมโคร-นาโน เพื่อประยุกต์ใช้ในการออกแบบของตัวแยกช่องสัญญาณสำหรับผู้ใช้หลายผู้ใช้
2. เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีอุปกรณ์ทางแสงซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้ในระบบสื่อสารทางแสง
3. เพื่อเผยแพร่องค์ความรู้ใหม่สู่ระดับนานาชาติ ในวารสารนานาชาติ

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 ออกแบบจากวงจรเสมือนจริงเพื่อหาผลลัพธ์ทางการวิเคราะค์จากโปรแกรมสำเร็จรูปได้

1.3.2 ผลทดลองที่สามารถประยุกต์หรือ สร้างเป็นตัวอุปกรณ์ หรือระบบการสื่อสารทางแสงในอนาคตได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ออกแบบจากวงจรเสมือนจริงเพื่อหาผลลัพธ์ทางการวิเคราะค์จากโปรแกรมสำเร็จรูปได้

1.4.2 สามารถประยุกต์จากผลการทดลอง สร้างเป็นตัวอุปกรณ์ หรือระบบการสื่อสารทางแสงในอนาคตได้

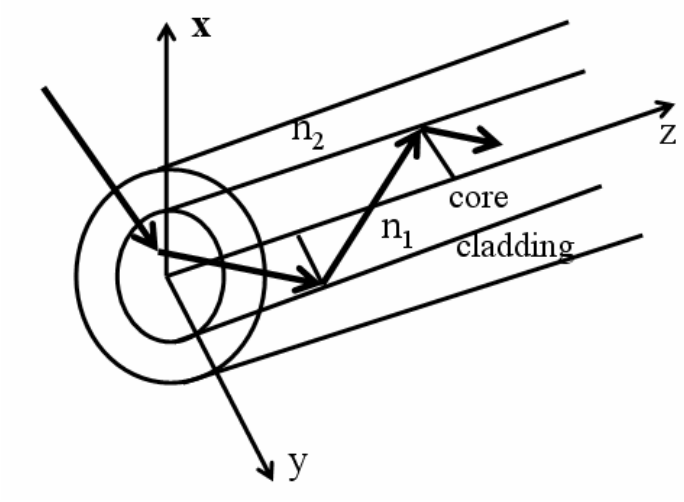
1.4.3 ได้ผลงานวิจัยตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ หรือ ระดับชาติได้ 2 บทความ

บทที่ 2
ปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น

งานวิจัยเรื่องปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงนี้สิ่งแรกที่จำเป็น คือ ต้องศึกษาปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นเชิงแสงก่อนรวมทั้งคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัย ภายในบทนี้จะประกอบไปด้วยหัวข้อต่างๆ ดังนี้ คือ ความไม่เป็นเชิงเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว พลวัตแบบไม่เป็นเชิงเส้นและเคออส และไบสเตบิลิตีเชิงแสง (Optical Bistability) ซึ่งจะเสนอเรียงตามลำดับดังต่อไปนี้

2.1 คุณสมบัติของแสงในเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติของแสงในใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว ลักษณะของทางเดินแสงในเส้นใยแก้วนำแสงนั้น แสงจะเดินทางในส่วนแกนของเส้นใยนำแสงเท่านั้น แสดงดังรูปที่ 2.1



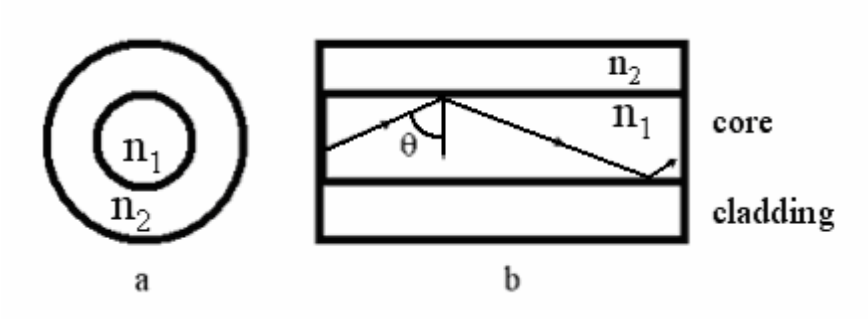
รูปที่ 2.1 แสดงการเดินทางของแสงในเส้นใยแก้วนำแสง

จากรูปที่ 2.1 แสงจะเดินทางสะท้อนไปมาภายในแกน โดยที่ค่าดัชนีหักเหเป็นไปตามเงื่อนไขคือ $n_1 < n_2$ เมื่อ n_1 และ n_2 คือดัชนีหักเหของแกนและแคลดดิงตามลำดับ ในที่นี้จะพิจารณาอย่างง่ายในท่อนำแสงแบบระนาบ เมื่อท่อนำแสงนั้นมีขอบเขตในทิศ x และ y แต่ไม่จำกัดในทิศ z โดยมีค่าคงที่ในการเคลื่อนที่ (propagation constant) β จะมีสมการของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเป็นดังนี้

$$\mathbf{E} = \mathrm{Re}\{\mathbf{E}_0(x,y)\exp[j(\omega t - \beta z)]\} \qquad (2.1)$$

$$\mathbf{H} = \mathrm{Re}\{\mathbf{H}_0(x,y)\exp[j(\omega t - \beta z)]\} \qquad (2.2)$$

ใยแก้วนำแสงมีลักษณะเป็นทรงกระบอก แกนกลางเป็นทรงกระบอกสารไดอิเล็กตริกซ์มีค่าดัชนี-หักเห n_1 ล้อมรอบด้วยชั้นแคลดของสารไดอิเล็กตริกซ์ที่มีค่าดัชนีหักเห n_2 แสงที่เดินทางเข้าสู่ใยแก้วนำแสงจะเกิดการสะท้อนกลับหมดอยู่ภายในชั้นแกนกลาง ในการพิจารณาการเดินทางของแสงในใย-แก้วชนิดโหมดเดียวจึงสามารถใช้สเลบเวฟไกด์ซึ่งเป็นชั้นฟิล์มบางไดอิเล็กตริกซ์ n_1 ประกบโดยชั้นสารไดอิเล็กตริกซ์ n_2 แทนได้



รูปที่2.2 แสดงชั้นสารไดอิเล็กตริกซ์ของใยแก้วนำแสง (a) และสเลบเวฟไกด์ (b) ซึ่งใช้พิจารณาแทน

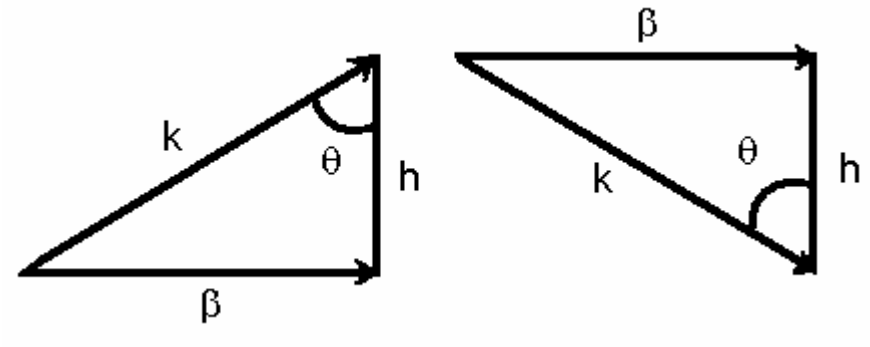
ใยแก้วนำแสง

รูปที่ 2.2(b) แสดงทิศทางของหน้าคลื่น เกิดการสะท้อนกลับหมด อยู่ภายในสเลบเวฟไกด์ ดังนั้นมุมของแสงที่สามารถเคลื่อนที่อยู่ภายในแกนกลางได้ ต้องทำมุม $\theta_c < \theta < 90°$ ตามความสัมพันธ์

$$\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1} \qquad (2.3)$$

แต่ในความเป็นจริง แสงเดินทางอยู่ในใยแก้วเฉพาะบางมุมเท่านั้น มุมที่แสงเคลื่อนที่คือโหมดของแสง แสงมีการเคลื่อนที่เป็นโหมดเนื่องจากขอบเขตรอยต่อของตัวกลางที่หุ้มคอร์อยู่ ประพฤติตัวเปรียบเสมือนโพรงสั่นพ้อง หน้าคลื่นของแสงเดินทางขึ้นตกกระทบรอยต่อด้านบนของชั้นแกนกลางด้วยมุมตกกระทบ θ เกิดการสะท้อนกลับหมดที่ผิวรอยต่อ แสงสะท้อนเดินทางลงด้วยมุม θ เช่นเดียวกัน ดังนั้นค่าคงที่ในการเคลื่อนที่สำหรับแนวการเคลื่อนที่ตามความยาวภายในท่อ(ในแนวนอน) สามารถพิจารณาได้

$$\beta = k \sin\theta = k_0 n_1 \sin\theta \tag{2.4}$$



รูปที่ 2.3 แสดงการเคลื่อนที่ของหน้าคลื่นตกกระทบ และหน้าคลื่นสะท้อน ภายในใยแก้วนำแสง

การเคลื่อนที่ของคลื่นทั้งสองรูปแบบในรูปที่ 2.3 ทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างคลื่นเคลื่อนที่ขึ้น กับคลื่นเคลื่อนที่ลง ดังนั้นสนามไฟฟ้าในแนวแกน y เปรียบเสมือนคลื่นซึ่งถูกขังอยู่ภายในโพรงสั่น-พ้อง ดังนั้นจึงมีเพาะบางมุม ตกกระทบที่ทำให้เส้นทางการเคลื่อนที่มีความถี่สั่นพ้องตรงกับความถี่ของแสงสีนั้นพอดี ดังนั้นแสงที่เดินทางในใยแก้วจึงเดินทางเป็นโหมด ๆ ไป

จากรูปที่ 2.3 การแทรกสอดระหว่างคลื่นสองรูปแบบ ทำให้โหมดของแสงในแนวแกน y มีลักษณะเป็นแบบคลื่นนิ่ง ดังสมการ

$$E = E_1 \cosh y \sin(\omega t - \beta z) \tag{2.5}$$

$$E = E_1 \sinh y \sin(\omega t - \beta z) \tag{2.6}$$

เนื่องจากคลื่นแสงที่เดินทางในในใยแก้วนำแสงเป็นการเคลื่อนที่ของกลุ่มคลื่น กลุ่มคลื่นเดินทางไปพร้อมกันด้วยความเร็วกลุ่ม v_g ดังนั้นค่าดัชนีหักเหของกลุ่มคลื่นขึ้นอยู่กับค่าคงที่การเคลื่อนที่ในแนวนอน ดังนี้

$$n_{eff} = \frac{c}{v_g} = \frac{c\beta}{\omega} = \frac{\beta}{k_0} \tag{2.7}$$

เนื่องจากใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว จะมีเส้นทางเดินของแสงเส้นทางเดียวซึ่งเป็นเส้นตรงผ่านแกนกลางของใยแก้วนำแสงไปตลอดจนสุดปลายใยแก้วนำแสง ทำให้มีข้อดีคือการผิดเพี้ยนของรูปร่างของสัญญาณต่ำ สามารถส่งสัญญาณไปได้ด้วยความถี่สูง และทำให้ส่งสัญญาณได้ไกลขึ้น

2.2 ความไม่เป็นเชิงเส้นในใยแก้วนำแสง (Source of Nonlinearity in an Optical Fiber)[8]

การตอบสนองใด ๆของสารไดอิเล็กตริกต่อแสงจะกลายเป็นการตอบสนองแบบไม่เป็นเชิงเส้น สำหรับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเข้มสูง (intense electromagnetic field) และใยแก้วนำแสงมาตรฐานที่เป็นซิลิกาซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริก โพลาไรเซชัน **P** ทั้งหมดในสนามไฟฟ้า **E** เป็นแบบไม่เชิงเส้น และกำหนดโดย

$$\mathrm{P} = \varepsilon_0 \left(\chi^{(1)} \cdot \mathrm{E} + \chi^{(2)} \cdot \mathrm{EE} + \chi^{(3)} \cdot \mathrm{EEE} + \ldots \right) \tag{2.8}$$

เมื่อ ε_0 คือ สภาพยอมได้ของสุญญากาศ (vacuum permittivity) = 8.8542 x 10^{-12} F/m
และ $\chi^{(j)}$ คือ สภาพอ่อนไหว (susceptibility) ของสารไดอิเล็กตริกอันดับที่ j (j = 1, 2, …)

- สภาพอ่อนไหวเชิงเส้น (Linear susceptibility), $\chi^{(1)}$ เป็นส่วนที่สำคัญของ **P** ที่ประกอบด้วยดัชนี-หักเห (n) และสัมประสิทธิ์การลดทอน (α)

- สภาพอ่อนไหวอันดับที่ 2, $\chi^{(2)}$ เป็นการตอบสนองสำหรับปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น เช่น การเกิดฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2 และการเกิดความถี่รวม แต่อย่างไรก็ตาม $\chi^{(2)}$ จะไม่เป็นศูนย์เลยทีเดียวสำหรับตัวกลางที่มีสมมาตรผกผัน (Inversion symmetry) ที่เป็นความบกพร่องระดับโมเลกุล เนื่องจากว่า SiO_2 เป็นโมเลกุลที่มีความสมมาตร $\chi^{(2)}$ จึงหายไปสำหรับใยแก้วซิลิกา ส่งผลให้ใยแก้ว-นำแสงโดยปกติแล้วจะไม่แสดงปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นอันดับที่ 2 ($\chi^{(2)}$) นี้

2.2.1 การหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear refraction)

ปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นอันดับต่ำ ๆที่เกิดขึ้นในใยแก้วนำแสงจะเริ่มต้นจากสภาพอ่อนไหวอันดับที่ 3 $\chi^{(3)}$ ซึ่งเป็นการตอบสนองสำหรับปรากฏการณ์ เช่น การเกิดฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3 การเกิดค่าความถี่อันใหม่ (four-wave mixing) และการหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้น แต่อย่างไรก็ตามเว้นแต่เฉพาะกรณีที่มีเฟสตรงกัน (phase matching) เท่านั้น กระบวนการแบบไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งจะนำไปสู่การเกิดค่าความถี่อันใหม่ (เช่น third-harmonic generation หรือ four-wave mixing) ซึ่งไม่มีผลอะไรต่อใย-แก้วนำแสงโดยเฉพาะอย่างยิ่งปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในใยแก้วนำแสง แม้ว่าจะเริ่มเกิดปรากฏการณ์นี้จากการหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้น ปรากฏการณ์ที่อ้างถึงค่าดัชนีหักเหที่ขึ้นกับความเข้ม-แสงที่เกิดจาก $\chi^{(3)}$ จะส่งผลให้ดัชนีหักเหของใยแก้วนำแสงจะกลายเป็น

$$\tilde{n}\left(\omega, |E|^2 \right) = n(\omega) + n_2 |E|^2 \tag{2.9}$$

เมื่อ n(ω) คือ ส่วนของดัชนีหักเหแบบเชิงเส้นและกำหนดโดยสมการของ Sellmier ที่เป็นความถี่การ-สั่นพ้อง (ω_j) ของซิลิกา

$$n^2(\omega) = 1 + \sum_{j=1}^{m} \frac{B_j \omega_j^2}{\omega_j^2 - \omega^2} \tag{2.10}$$

เมื่อ ω_j คือ ความถี่กำทอน

B_j คือ ความเข้มของการสั่นพ้องอันดับที่ j

และ $|E|^2$ คือ ความเข้มแสงภายในใยแก้วนำแสง

n_2 คือ สัมประสิทธิ์ดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่สอดคล้องกับ $\chi^{(3)}$ โดยความสัมพันธ์

$$n_2 = \frac{3}{8n}\mathrm{Re}\left(\chi^{(3)}_{xxxx}\right) \tag{2.11}$$

เมื่อ ส่วนจริง (Re) และสนามแสงเป็นการสมมติว่าเป็นโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น ดังนั้นตลอด 1 ส่วนประกอบ $\chi^{(3)}_{xxxx}$ ของเทนเซอร์อันดับที่ 4 ที่เกิดจากดัชนีหักเหและ tensorial nature ของ $\chi^{(3)}$ จะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติโพลาไรเซชันของลำแสง (optical beam) ตลอดจนไบพริงเจนว์แบบไม่เป็น-เชิงเส้น

ดัชนีหักเหที่ขึ้นกับความเข้มแสงนำไปสู่คุณลักษณะของปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นที่น่าสน-ใจมากมาย ปรากฏการณ์ 2 ปรากฏการณ์ที่ได้การศึกษาอย่างกว้างขวาง คือ self-phase modulation (SPM) และcross-phase modulation (XPM) SPM จะกล่าวถึง self-induced phase shift ที่เกิดจากสนามแสงระหว่างการเดินทางของแสงภายในใยแก้วนำแสง ทำให้เฟสของสนามแสงเปลี่ยนไป โดย

$$\phi = \tilde{n}k_0 L = \left(n + n_2|E|^2\right)k_0 L \tag{2.12}$$

เมื่อ $k_0 = 2\pi/\lambda$ และ L คือ ความยาวของใยแก้วนำแสง

การเปลี่ยนเฟสไม่เป็นเชิงเส้นที่ขึ้นกับความเข้มแสง $\phi_{NL} = n_2 k_0 L|E|^2$ เกิดขึ้นเนื่องจาก SPM ระหว่างสิ่งอื่นๆ SPM จะเป็นการตอบสนองสำหรับ spectrum broadening ของ ultrashort pulses และการเกิดโซลิตอนทางแสงในบริเวณ anomalous-dispersion ของใยแก้วนำแสง

ส่วน XPM จะกล่าวถึงการเปลี่ยนเฟสไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear phase shift) ของสนามแสงที่เกิดโดยสนามที่เดินทางร่วม (co-propagating field) ที่ความยาวคลื่นต่างกัน สนามไฟฟ้า **E** ของ XPM ทั้งหมดในสมการ (2.8) กำหนดโดย

$$E = \frac{1}{2}\hat{x}\left[E_1 \exp\left(-i\omega_1 t\right) + E_2 \exp\left(-i\omega_2 t\right) + c.c.\right] \quad (2.13)$$

เมื่อสนามแสงทั้งสองที่ความถี่ ω_1 และ ω_2 ตลอดโพลาไรซ์ในแกน x ที่เดินทางร่วมพร้อมกันในใย-แก้วนำแสง การเปลี่ยนเฟสไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับสนามที่ ω_1 กำหนดโดย

$$\phi_{NL} = n_2 k_0 L\left(\left|E_1\right|^2 + 2\left|E_2\right|^2\right) \quad (2.14)$$

เมื่อไม่คิดทุกเทอมที่เกิดจากโพลาไรเซชันที่ความถี่อื่นที่นอกเหนือจาก ω_1 และ ω_2 เพราะว่าเป็นคุณลักษณะของเฟสที่ต่างกัน (non-phase-matched) 2 เทอมทางขวามือของสมการ (2.14) เกิดขึ้นเนื่องจาก SPM และXPM ตามลำดับ คุณลักษณะที่สำคัญของ XPM คือ สำหรับสนามแสงที่มีความ-เข้มแสงเท่ากันนั้นการเปลี่ยนเฟสแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear phase shift) ที่เกิดจาก XPM จะมีค่าเป็น 2 เท่าเมื่อเทียบกับ SPM และ XPM จะตอบสนองสำหรับ asymmetric spectral broadening ของพัลส์แสงที่เดินทางร่วมกัน

2.2.2 ความสำคัญของปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (Importance of Nonlinear Effects)

การวัดค่าสัมประสิทธิ์ดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้น (n_2) ของใยแก้วชนิดซิลิกาในเชิงการทดลองได้ค่าอยู่ในช่วง 2.2 – 3.4 x 10^{-20} m^2/W [8] ซึ่งค่านี้ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของแกนใยแก้วนำแสง ค่านี้เป็นค่าที่น้อยมากเมื่อเทียบกับตัวกลางแบบไม่เป็นเชิงเส้นอื่นๆ โดยมีขนาดน้อยกว่าเป็น 2 เท่า ปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในใยแก้วนำแสงสามารถพบได้ที่ระดับกำลังอินพุตต่ำเป็นเพราะว่า 2 คุณลักษณะที่สำคัญของใยแก้วนำแสงโหมดเดี่ยวที่มีพื้นที่แกนยังผลขนาดเล็กและการสูญเสียสัญญาณต่ำ ใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนประมาณ 5 μm ดังนั้นเป็นเหตุให้ความเข้มแสงภายในใยแก้วมีความเข้มสูงแม้ว่าจะใช้กำลังแสงอินพุตระดับต่ำๆ การสูญเสียต่ำในใย-แก้วนำแสง (< 10 dB/km) จึงได้นำใยแก้วนำแสงมาศึกษาปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น

2.3 ฟิสิกส์ของการเดินทางของพัลส์แสง (Physics of propagation pulses)

ในทางคณิตศาสตร์ขีดจำกัดแบบดั้งเดิม [8] การเดินทางของพัลส์แสงในใยแก้วนำแสงสามารถอธิบายด้วยสมการของแมกซ์เวลล์ ดังนี้

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$
$$\nabla \times \vec{H} = \overline{J_f} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \qquad (2.15)$$
$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_f$$
$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

เมื่อ **E** และ **H** คือเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามลำดับ และ **D** และ **B** คือความ-หนาแน่นฟลั๊กซ์ไฟฟ้าและฟลั๊กซ์แม่เหล็กตามลำดับ J_f คือ ความหนาแน่นกระแส และ ρ_f คือ ความ-หนาแน่นของประจุอิสระ ในกรณีตัวกลางไม่มีประจุอิสระเช่นใยแก้วนำแสง นั่นคือ $J_f = 0$ และ$\rho_f = 0$

ความหนาแน่นฟลั๊กซ์ **D** และ **B** ที่เกิดขึ้นในการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้า **E** และสนามแม่เหล็ก **H** ที่เดินทางภายในตัวกลาง ตามความสัมพันธ์

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$
$$\vec{E} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M} \qquad (2.16)$$

เมื่อ ε_0 คือ สภาพยอมได้ของสุญญากาศ μ_0 คือสภาพซึมได้ของสุญญากาศ และ **P** และ **M** คือ การ-เหนี่ยวนำโพลาไรเซชันไฟฟ้าและแม่เหล็กตามลำดับ ใช้ตัวดำเนินการเครอล์ (curl) กับสมการแรกของสมการที่ (2.15) และใช้สมการที่สองของสมการที่ (2.15) และ (2.16) เพื่อกำจัด **B** และ **D** จะได้

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial t^2} \qquad (2.17)$$

เมื่อใช้ความสัมพันธ์ $\mu_0 \varepsilon_0 = 1/c^2$ และ c คือความเร็วแสงในสุญญากาศ

ช่วงความยาวคลื่นของใยแก้วนำแสง 0.5 – 2 μm เป็นช่วงสำหรับการศึกษาปรากฏการณ์แบบไม่-เป็นเชิงเส้นซึ่งเป็นปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นอันดับที่ 3 ($\chi^{(3)}$) ในการเหนี่ยวนำการเกิดโพลาไรเซ-ชันที่ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

$$\vec{P}(\vec{r},t) = \vec{P}_L(\vec{r},t) + \vec{P}_{NL}(\vec{r},t) \qquad (2.18)$$

เมื่อ $\vec{P}_L$ คือส่วนเชิงเส้น และ $\vec{P}_{NL}$ คือส่วนไม่เชิงเส้น ที่สัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าโดยทั่วไป คือ

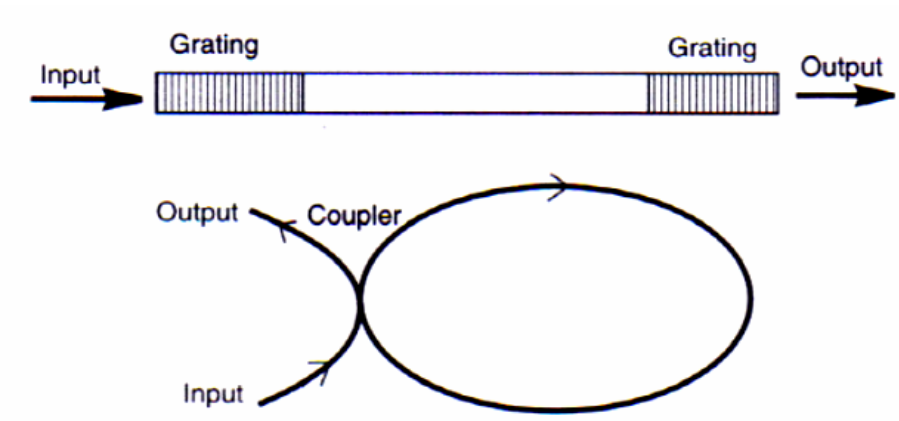
$$\vec{P}_L(\vec{r},t) = \varepsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} \chi^{(1)}(t-t') \cdot \vec{E}(\vec{r},t')dt' \qquad (2.19)$$

และ

$$\vec{P}_{NL}(\vec{r},t) = \varepsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} \int \chi^{(3)}(t-t_1, t-t_2, t-t_3) \vdots \vec{E}(\vec{r},t_1)\vec{E}(\vec{r},t_2)\vec{E}(\vec{r},t_3)dt_1 dt_2 dt_3 \qquad (2.20)$$

2.4 หลักการของแฟบริ-เฟอโรต์และโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวน

อุปกรณ์แฟบริ-เฟอโรต์และโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนของใยแก้วนำแสงสามารถสร้างได้ง่ายๆ [9]โดยการทำให้ปลายทั้งสองข้างใยแก้วนำแสงมีค่าการสะท้อนกลับบางส่วน ในทางปฏิบัติสามารถทำได้จริงโดยใช้กระจกวางขอบนอกหรือการเคลือบ (coatings) สารเจือที่มีค่าการสะท้อนสูงที่ปลายทั้งสองข้างของใยแก้วนำแสงหรือที่ง่ายกว่านี้คือการเชื่อมใยแก้วชนิดแบรกเกรตติงที่ปลายทั้งสองข้างของใยแก้วนำแสงดังแสดงในรูปที่ 2.4 การสร้างโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงที่ง่ายกว่านี้สามารถทำได้โดยการเชื่อมต่อปลายใยแก้วนำแสงทั้งสองด้วยคัปเปลอร์ใยแก้วนำแสงในรูปแบบของอินพุตและเอาท์พุตพอร์ตดังแสดงในรูปที่ 2.4 ในหัวข้อนี้จะอธิบายปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดขึ้นในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสง ในส่วนแรกจะพิจารณากรณีของคลื่นที่เดินทางแบบต่อเนื่อง (CW) โดยจะกล่าวในส่วนของไบสเตบิลิตีเชิงแสงและเคออส



รูปที่ 2.4 แฟบริ-เฟอโรต์และโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนของใยแก้วนำแสงที่สร้างโดยใช้แบรกเกรตติงและคัปเปลอร์ใยแก้วนำแสงตามลำดับ

การส่งผ่านของโพรงสั่นพ้องชนิดแฟบริ-เฟอโรต์โดยใช้กระจกที่เหมือนกัน 2 บานที่มีค่าการสะท้อนกลับเป็น R_m สามารถคำนวณโดยการเพิ่มสนามแสงโคฮีเร้นต์ที่เป็นการส่งผ่านของการวนลูป พิจารณาลำแสง CW ในโพรงสั่นพ้องที่ประกอบด้วยคลื่นที่เดินทางในส่วนไปข้างและส่วนสะท้อนกลับในโพรงสั่นพ้องและสามารถเขียนได้เป็น

$$E(r,t) = \frac{1}{2}F(x,y)\left\{A(z)\exp\left[i(\tilde{\beta}z - \omega t)\right] + B(z)\exp\left[-i(\tilde{\beta}z + \omega t)\right] + c.c.\right\} \quad (2.21)$$

เมื่อ F(x,y) คือการกระจายแสงบางส่วน และ $\tilde{\beta}$ ค่าคงที่การเดินทางของคลื่นที่สอดคล้องกับโหมดพื้นฐานของใยแก้วนำแสง ลักษณะการส่งผ่านหาได้โดยการเพิ่มจำนวนการวนลูปเป็นอนันต์เข้าไป และกำหนดโดย

$$A(L) = \frac{(1-R_m)A(0)}{1 - R_m \exp(i\tilde{\beta}L_R)} \quad (2.22)$$

เมื่อ $L_R \equiv 2L$ คือระยะทางการวนลูปสำหรับใยแก้วนำแสงที่ยาว L

ค่าการส่งผ่านของโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนหาได้จากสมการ (2.22) และกำหนดโดย Airy formula

$$T_R = \frac{P_t}{P_i} = \left|\frac{A(L)}{A(0)}\right|^2 = \frac{(1-R_m)^2}{(1-R_m)^2 + 4R_m \sin^2(\phi_R/2)} \quad (2.23)$$

เมื่อ $P_i = |A(0)|^2$ คือ กำลังอินพุตแสง

P_t คือ กำลังการส่งผ่านแสง

และ $\phi_R = \tilde{\beta}L_R$ คือ การเปลี่ยนเฟสที่เกิดขึ้นตลอดการวนลูปภายในโพรงสั่นพ้อง ปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นและการกระเจิงที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนเฟสนี้สามารถแยกออกได้เป็น 2 ส่วน คือ

$$\phi_R(\omega) \equiv \phi_0(\omega) + \phi_{NL} = \left[\beta(\omega) + \Delta\beta_{NL}\right]L_R \quad (2.24)$$

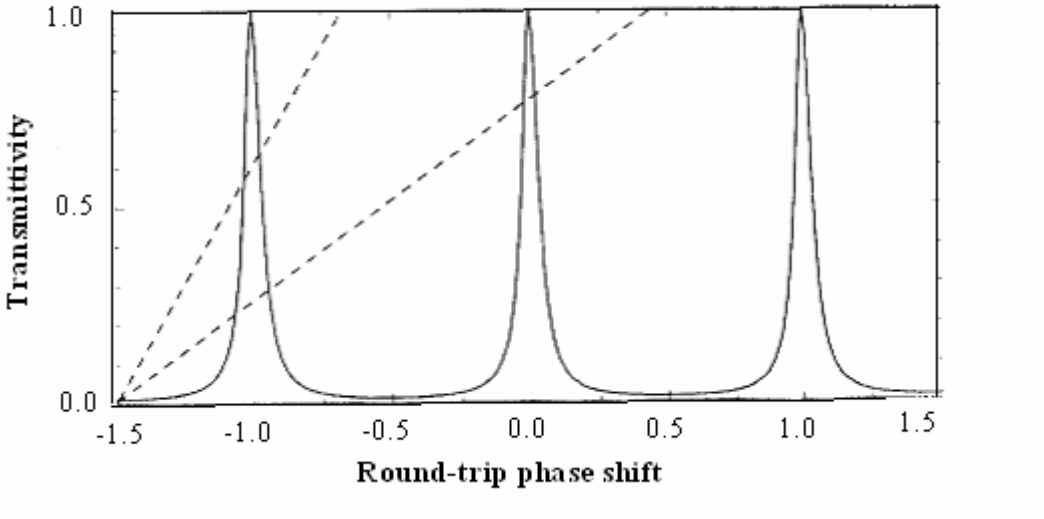
ส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้น ϕ_{NL} แทนส่วนที่เกิดจาก SPM และสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ไม่เป็นเชิงเส้น γ คือ

$$\phi_{NL} = \gamma\int_0^L \left(|A(z)|^2 + |B(z)|^2\right)dz = \gamma P_{av} L_R \quad (2.25)$$

เมื่อ P_{av} คือ ระดับกำลังแสงเฉลี่ยภายในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวน

ที่ระดับกำลังแสงอินพุตต่ำ นั่นคือ $\phi_{NL} \ll 1$ ปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นสามารถตัดทิ้งได้ ในกรณีของแสงที่ตกกระทบเป็นการทะลุผ่าน 100 เปอร์เซ็นต์ (T_R = 1) เมื่อ $\phi_0 = 2m\pi$ เมื่อ m เป็นจำนวนเต็ม ความถี่ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขนี้จะสัมพันธ์กับโหมดตามยาวของโพรงสั่นพ้องแบบวง-

แหวน การส่งผ่านแสงจะลดลงที่ค่าความถี่ของแสงตกกระทบเป็นการปรับให้ออกห่าง (detune) จากความถี่การสั่นพ้อง



รูปที่ 2.5 การส่งผ่านของโพรงสั่นพ้องชนิดแฟบริ-เฟอโรต์ที่เป็นฟังก์ชันของ $\phi_0/2\pi$ สำหรับ R_m = 0.8.

เส้นประแทนการเปลี่ยนแปลงของ ϕ_R ที่เกิดขึ้นเนื่องจาก SPM ที่ระดับกำลังอินพุต 2 ค่า

กราฟเส้นหนาในรูปที่ 2.5 แสดงการส่งผ่านของโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงที่เป็นฟังก์ชันของ ϕ_0 สำหรับ R_m = 0.8 ช่วงความถี่ $\Delta\upsilon_L$ ระหว่างพีคของการส่งผ่านที่สมบูรณ์เป็นช่วง-ปลอดสเปคตรัม (free-spectral range) บางทีในเลเซอร์เรียกว่าช่วงของโหมดตาม ซึ่งใช้หาเงื่อนไขของเฟสที่ตรงกัน (phase-matching) คือ

$$\left[\beta\left(\omega+2\pi\Delta\upsilon_L\right)-\beta\left(\omega\right)\right]L_R=2\pi \tag{2.26}$$

และเป็นการประมาณโดย $\Delta\upsilon_L=\upsilon_g/L_R\equiv 1/T_R$ เมื่อ $\upsilon_g\equiv 1/\beta_1$ คือความเร็วกลุ่มและ T_R คือเวลาการวนลูปในโพรงสั่นพ้องเป็นเพราะว่าการกระเจิงความเร็วกลุ่ม (GVD) ทำให้ช่วงปลอดสเปคตรัมของโพรงสั่นแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงขึ้นกับค่าความถี่ ซึ่งสามารถพิจารณาได้ในแฟบริ-เฟอโรต์ที่ใช้แบรกเกรตติงเพราะว่า GVD ส่วนใหญ่แล้วสัมพันธ์กับแบรกเกรตติง

กราฟเส้นประของพีคการสั่นพ้องในรูปที่ 2.5 เป็นการจำกัดของเงื่อนไขฟิเนสส์ F_R ของโพรงสั่น-พ้องแบบวงแหวนที่นิยามเป็น

$$F_R = \frac{\Delta\upsilon_L}{\Delta\upsilon_R} = \frac{\pi\sqrt{R_m}}{1-R_m} \tag{2.27}$$

เมื่อ $\Delta\upsilon_R$ คือความกว้างการสั่นพ้องในแต่ละพีค (at half maximum).

สมการที่ (2.23) จะเปลี่ยนไปสำหรับโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงและสัมพันธ์กับค่าคงที่ของการเปลี่ยนเฟสเป็น $\pi/2$ ที่เกิดขึ้นเมื่อแสงเดินทางตัดขวางจากแกนใยแก้วหนึ่งไปยังแกน-ใยแก้วอื่นภายในคัปเปลอร์ใยแก้วนำแสง นั่นคือ B(z) = 0 ในสมการที่ (2.22) สำหรับโพรงสั่นพ้อง-แบบวงแหวนใยแก้วนำแสงเนื่องจากคลื่นที่เดินทางในส่วนที่เดินทางย้อนกลับนั้นจะไม่เกิดขึ้นในกรณีนี้ ลักษณะเช่นนี้สามารถอธิบายด้วยคณิตศาสตร์ง่าย ๆและมีประโยชน์ในการพิจารณาปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเหนี่ยวนำของ XPM ที่เป็นการคัปปลิงกันระหว่างคลื่นที่เดินทางในส่วนเดินทางไปข้างหน้าและส่วนการย้อนกลับนั้นจะไม่สามารถเกิดขึ้นในโพรงสั่นพ้อง-แบบวงแหวนที่มีทิศทางการเดินของแสงทิศเดียว (unidirectional ring resonators)

2.5 Field Enhancement

พิจารณาโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนในรูปที่ 1.1 ที่สภาวะคงที่สนามในส่วนการวนลูปภายในโพรง-สั่นพ้องสามารถเขียนได้เป็น

$$E_r = -i\kappa E_i + rae^{i\phi}E_r \tag{2.28}$$

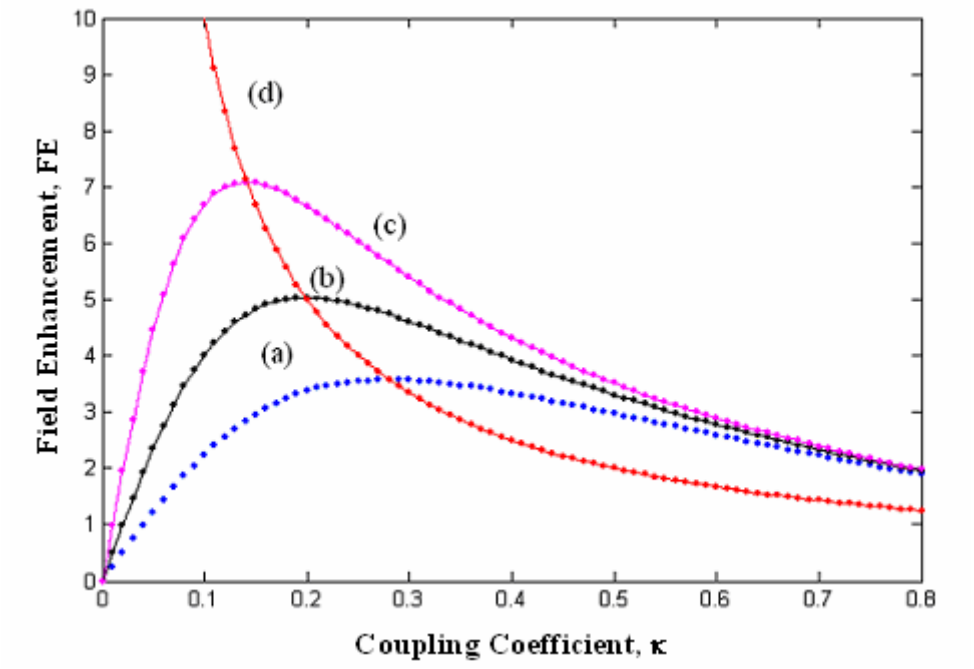
เพราะฉะนั้นอัตราส่วนของสนามการวนลูปต่อสนามอินพุตเป็นการกำหนดโดย

$$\frac{E_r}{E_i} = \frac{-i\kappa}{1-rae^{i\phi}} \tag{2.29}$$

นิยามของแฟคเตอร์ field enhancement (FE) คือขนาดของอัตราส่วนสนามการวนลูปภายในโพรงสั่น-พ้อง E_r ต่อสนามอินพุต E_i ที่การสั่นพ้อง นั่นคือ $\phi = 0$ ดังนั้น FE กำหนดโดย

$$FE = \left|\frac{E_r}{E_i}\right|_{\phi=0} = \frac{\kappa}{1-ar} \tag{2.30}$$

นั่นคือค่า FE สูงจะส่งผลให้ความเข้มแสงภายในโพรงสั่นพ้องเพิ่มสูงขึ้นและที่ระดับกำลังแสงอินพุตต่ำจะทำให้เกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นเกิดขึ้นได้ เพราะฉะนั้นจึงเป็นสิ่งที่สำคัญในการทำความเข้าใจต่อขีดจำกัดของแฟคเตอร์ FE สำหรับการศึกษาโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวน



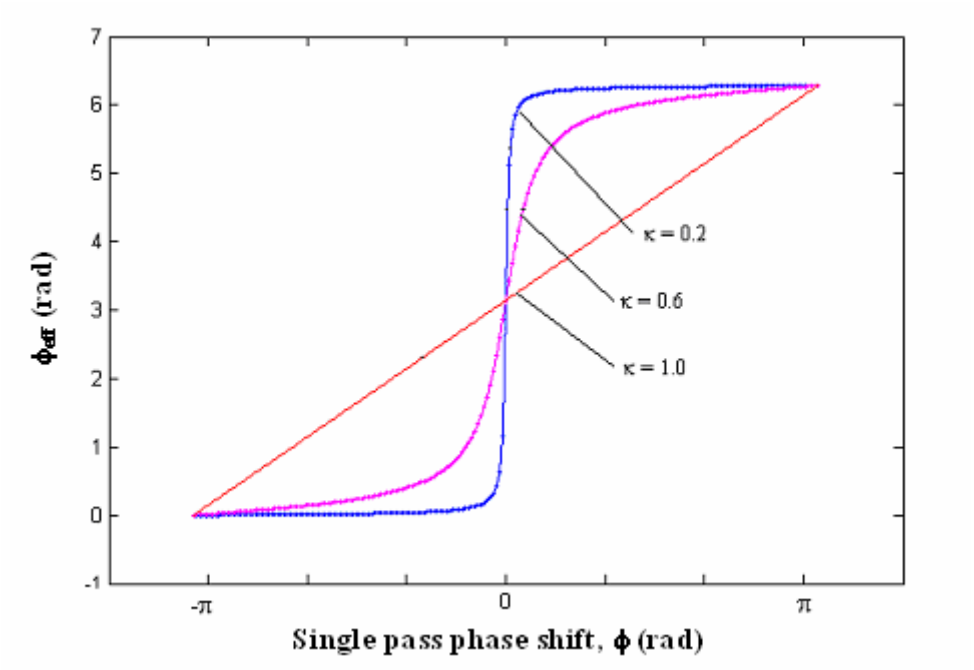
รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามเอนฮานซ์เมนต์ FE กับสัมประสิทธิ์การคัปปลิง สำหรับ (a) a = 0.96 (b) a = 0.98 (c) a = 0.99 และ (d) $a = (1-\kappa^2)^{1/2}$

ในรูปที่ 2.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามเอนฮานซ์เมนต์กับสัมประสิทธิ์การคัปปลิงแสงสำหรับค่าที่แตกต่างกันของการส่งผ่านสนามการวนลูป a ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า a สูงๆ การสูญเสียเนื่องจากการวนลูปจะน้อยกว่าค่า a ต่ำๆ

2.6 All-Pass or Phase Filter

สำหรับโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนที่ไม่มีการลดทอนสัญญาณ นั่นคือ a = 1 ขนาดของฟังก์ชันทรานสเฟอร์การส่งผ่านที่กำหนดในสมการที่ (1.5) ในบทที่ 1 นั้นมีค่าเป็น 1 โดยไม่คำนึงถึงผลของ ϕ แต่อย่างไรก็ตามการตรวจสอบเฟสแสดงให้เห็นว่าถึงเฟส enhancement เช่นเดียวกับสนาม enhancement ฟังก์ชันเฟสของโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวน ϕ_{eff} สามารถหาได้โดยพิจารณาเฟสที่เทอมทางขวามือของสมการ (1.5) ดังนั้นกำหนดโดย

$$\phi_{eff} = \pi + \phi + \tan^{-1}\frac{r\sin\phi}{a - r\cos\phi} + \tan^{-1}\frac{ar\sin\phi}{1 - ar\cos\phi}. \qquad (2.31)$$



รูปที่ 2.7 เฟสเอนฮานซ์เมนต์ของโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนที่ไม่มีการสูญเสียสัญญาณแสง และค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิงที่ต่างกัน

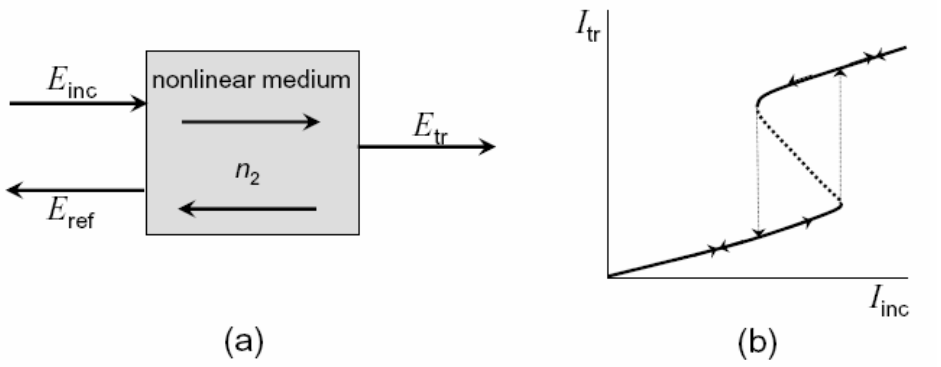
ในรูปที่ 2.7 เป็นการพล็อตกราฟของสมการที่ (2.31) สำหรับค่าแตกต่างกันของสัมประสิทธิ์การ-คัปปลิงสนาม κ สำหรับโพรงสั่นพ้องที่ไม่มีการสูญเสีย จะเห็นได้ว่าที่การสั่นพ้อง (near resonance) นั่นคือที่ $\phi = 0$ นั้นความชันของเฟสยังผลจะมีความชันมาก ดังนั้นเอาท์พุตเฟสของอุปกรณ์จึงไวต่อการเปลี่ยนแปลงใน single-pass phase shift ของวงแหวน

2.7 ไบสเตบิลิตีเชิงแสง (Optical Bistability)

ปรากฏการณ์ที่สามารถทำให้โพรงสั่นพ้องเชิงแสงมีพฤติกรรมเหมือนกันกับอุปกรณ์ฟลิป-ฟลอป ของสารกึ่งตัวนำ (semiconductor flip-flop) [21] อุปกรณ์ไบสเตบิลิตีจะมีความเสถียรใน 2 สภาวะเชิง-แสง อันแรก คือ สภาวะการทะลุผ่านสูง (high transmission) และ อันที่สอง คือ การทะลุผ่านต่ำ (low transmission) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเข้มแสงที่ทะลุผ่านโพรงสั่นพ้องเชิงแสงนั้น ในสภาวะของการทะลุผ่านต่ำ ความยาวของการเดินทางของแสงตลอดตัววัสดุซึ่งวางอยู่ระหว่างกระจกที่สะท้อนแสงบางส่วน เป็นผลของการแทรกสอดบริเวณทึบ (dim) แสง แต่ในสภาวะของการทะลุผ่านสูงจะเกิดขึ้นโดยการเพิ่มความเข้มแสงอินพุต ระยะทางเดินทางแสง (path length) ไปทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นทั้งหมดโดยคุณสมบัติการแทรกสอดของวัสดุแบบไม่เป็นเชิงเส้น และเป็นผลให้คลื่นมีเฟสตรงกันในโพรงสั่นพ้องทำให้เอาท์พุตของแสงมีความเข้มแสงมากขึ้น

การศึกษาไบสเตบิลิตีและอุปกรณ์ไบสเตบิลิตีเป็นการศึกษาอีกแขนงหนึ่งเฉพาะทางแสงแบบไม่-เป็นเชิงเส้น (nonlinear optics) ไบสเตบิลิตีทางแสงสามารถเกิดขึ้นจริงในโครงสร้างหลายชนิด

แต่อย่างไรก็ตามโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงมี หลักการคล้ายอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ชนิดแฟ-บริ-เพอโรต์ ดังนั้นจึงศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ชนิดแฟบริ-เฟอโรต์ที่ประกอบด้วยตัวกลางชนิดไม่เป็นเชิงเส้นของเคอร์ (Kerr nonlinear media) เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสง



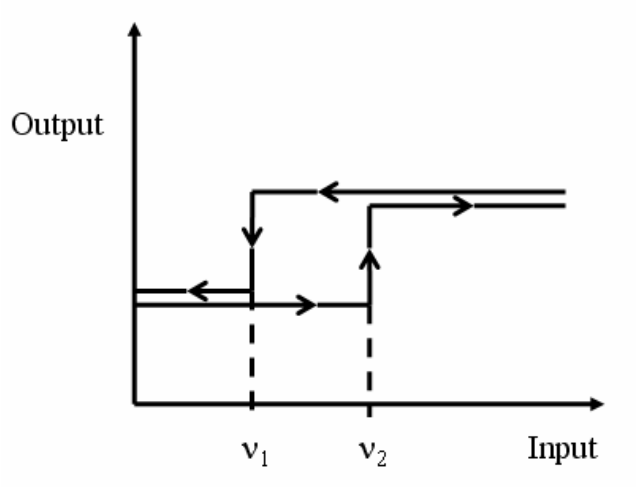
รูปที่2.8 (a) แสดงแผนภาพของอินเตอร์เฟอร์โรมิเตอร์ของแฟบรี-เฟอโรต์ (Fabry-Perot (F-P) interferometer) ที่มีตัวกลางแบบไม่เป็นเชิงเส้น
(b) การตอบสนองไบสเตเบิลของอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ชนิดแฟบรี-เฟอโรต์

ลักษณะของโครงสร้างที่คล้าย F-P ที่สร้างจากตัวกลางแบบไม่เป็นเชิงเส้นอันเดียว (single nonlinear medium) หรือ ประกอบด้วยโครงสร้างของแบบไม่เป็นเชิงเส้นหลายชั้น (nonlinear multi-layer structures) โครงสร้างตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.8(a) สนามแสงที่ตกกระทบจากทางซ้ายมือ (E_{inc}) จะถูกแยกออกเป็นสนามการสะท้อนกลับและสนามการทะลุผ่านโดยกระจกส่วนหน้า ในส่วนของสนามทะลุผ่านก็จะมีส่วนของการสะท้อนกลับและทะลุผ่านโดยกระจกส่วนหลัง สนามการสะท้อนกลับโดยกระจกส่วนหลังจะมีทิศทางย้อนกลับมายังกระจกส่วนหน้าเมื่อสัดส่วนเป็นการสะท้อนกลับอีกครั้งและเกิดขึ้นอย่างนี้อย่างต่อเนื่องไปเรื่อยๆ สนามไฟฟ้าของการสะท้อนกลับเขียนแทนด้วย E_{ref} ในขณะที่สนามไฟฟ้าของการทะลุผ่านจาก F-P เขียนแทนด้วย E_{tr} ถ้า F-P เป็นแบบเชิงเส้น ดังนั้นความเข้มข้นของการทะลุผ่าน (I_{tr}) จะถูกกำหนดโดยตรงด้วยความเข้มแสงอินพุต (I_{inc}) แต่อย่างไรก็ตามใน F-P ที่มีตัวกลางของเคอร์ภายใต้ผลของความเข้มแสง อุปกรณ์นี้จะมีพฤติกรรมการตอบสนองแบบไม่เป็นเชิงเส้นกับความเข้มแสงที่ตกกระทบ นั่นคือ I_{tr} เป็นฟังก์ชันแบบไม่เป็นเชิงเส้นของ I_{inc} นั่นคือประกอบด้วยฮิตเตอรีซีสลูป ดังแสดงในรูปที่ 2.8(b) ซึ่งสอดคล้องกับไบสเตบิลิตีเชิงแสง (optical bistability) สำหรับค่ากำลังแสงอินพุตค่าเดียวจะสอดคล้องกับไบสเตบิลิตีของอุปกรณ์ ลักษณะของสภาวะจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของระบบ (history of the system) บนพื้นฐานเช่นการตอบสนองแบบไม่เป็นเชิงเส้นอุปกรณ์ชนิดนี้สามารถนำไปใช้เป็นสวิตซ์ทางแสง (optical switch), ตัวจำกัดทางแสง (optical limiter) หรือ หน่วยความจำทางแสง (optical memory) เนื่องจากว่าถ้าปรากฏการณ์ไบสเตบิลิตีเชิงแสงเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากคุณสมบัติเชิงกลของการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหทางแสง (light-induced refractive Index)

ในตัวกลาง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ไบสเตบิลิตีเชิงแสงแบบการกระเจิง (dispersive optical bistability)” แต่ถ้าปรากฏการณ์ที่เกิดจากคุณสมบัติเชิงกลของการเปลี่ยนแปลงที่ขึ้นกับการดูดกลืนความเข้มแสงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ไบสเตบิลิตีเชิงแสงแบบการดูดกลืน (absorptive optical bistability)”

2.7.1 ระบบไบสเตเบิล (Bistable Systems)

ระบบไบสเตเบิลจะมีค่าเอาท์พุต 2 ค่า (เรียกว่าสภาวะ) เมื่ออินพุตมีค่าเดียวดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ระบบไบสเตบิลิตีเชิงแสง

จากรูปที่ 2.9 เมื่ออินพุตเพิ่มสูงกว่าค่าขีดเริ่ม ν_1 ค่าเอาท์พุตจะสวิตซ์ไปยังเอาท์พุตที่ระดับสูงกว่า ถ้าระดับอินพุตลดลงต่ำกว่าค่าขีดเริ่ม ν_2 ค่าเอาท์พุตจะสวิตซ์ไปยังเอาท์พุตที่ระดับต่ำกว่า ดังนั้นระหว่างค่า ν_1 และ ν_2 นี้สภาวะ 2 สภาวะที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นกับลักษณะของอินพุต

2.7.2 หลักการของไบสเตบิลิตีเชิงแสง

ระบบที่จะเกิดไบสเตบิลิตีได้ต้องประกอบด้วยคุณสมบัติเชิงกล 2 อย่างดังนี้

1) ความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearity)
2) การย้อนกลับทางแสง (feedback)

ในระบบเชิงแสงประกอบด้วยคุณสมบัติเชิงกลทั้งสองเกิดขึ้นพร้อมกัน ระบบไบสเตเบิลเชิงแสง เช่น แฟบริ-เฟอโรต์ชนิดอีตาลอนหรือแควิตีแบบวงแหวนโดยใช้ตัวกลางแบบไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งมีคุณสมบัติการย้อนกลับทางแสงและส่วนเชิงแสงแบบไม่เป็นเชิงเส้น 2 ชนิด คือ

1) ส่วนการกระเจิง (dispersive elements) ในส่วนนี้ค่าดัชนีหักเห (n) เป็นฟังก์ชันของความเข้มแสง

2) ส่วนการดูดกลืนแบบไม่เป็นเชิงเส้น (absorptive nonlinear elements) ในส่วนนี้สัมประสิทธิ์การดูดกลืน (α) เป็นฟังก์ชันของความเข้มแสง

2.7.2.1. ส่วนการกระเจิง (dispersive elements)

ในส่วนของการกระเจิงนี้ค่าสภาพอ่อนไหว (susceptibility) อันดับที่ 3 ของตัวกลางแบบไม่เป็นเชิงเส้น $P\,\alpha\,\chi^{(3)}E^3$ ทำให้ค่าดัชนีหักเหขึ้นกับค่าความแสงอินพุต นั่นคือ

$$n = n_0 + n_2 |E|^2 \tag{2.32}$$

เมื่อความเข้มแสงอินพุตเปลี่ยนแปลงจะทำให้ความเข้มแสงภายในแคว๊ตีเปลี่ยนแปลงด้วย ซึ่งส่งผลให้ค่าดัชนีหักเหของตัวกลางแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear medium) เปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสงอินพุตและการเปลี่ยนเฟสเมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งถึงจุดเสถียร

2.7.2.2. ส่วนการดูดกลืนแบบไม่เป็นเชิงเส้น (absorptive nonlinear elements)

ในส่วนการดูดกลืนแบบไม่เป็นเชิงเส้นนี้ตัวดูดกลืนที่อิ่มตัวมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเป็นฟังก์ชันของความเข้มแสงแบบไม่เป็นเชิงเส้น นั่นคือ

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + |E|^2 / |E_s|^2} \tag{2.33}$$

เมื่อ E_s คือ ความเข้มแสงของการอิ่มตัว

เมื่อเราจัดแคว๊ตีสำหรับการสั่นพ้อง ที่ความเข้มแสงน้อยการดูดกลืนเนื่องจากส่วนนี้จะมีการดูดกลืนสูงมากและเอาท์พุตแสงจะมีค่าต่ำ แต่เมื่อความเข้มแสงอินพุตเพิ่มขึ้นมากกว่า E_s การดูดกลืนจะลดลงอย่างรวดเร็วและเอาท์พุตแสงจะมีค่าสูง ในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงถือว่ามีการดูดกลืนแสงน้อยมาก

2.7.3 ไบสเตบิลิตีเชิงแสงในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสง

ปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นของไบสเตบิลิตีเชิงแสงได้มีการศึกษาในโพรงสั่นพ้องที่ไม่ใช่วง-แหวนใยแก้วนำแสงเมื่อปี ค.ศ. 1976 โดยการวางตัวกลางแบบไม่เป็นเชิงเส้นภายในแคว๊ตีโดยใช้กระจกหลายอัน [1-5] แต่โพรงสั่นพ้องที่ใช้ใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวเป็นตัวกลางแบไม่เป็นเชิงเส้นภายในแคว๊ตีแบบวงแหวนในปี ค.ศ. 1983 [6] ดังนั้นการศึกษาปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงพิจารณาจากสมการที่ (2.23) นั่นคือการเปลี่ยนเฟส ϕ_R ที่เป็นการวนรอบที่ขึ้นกับกำลังแสงอินพุตเพราะว่าการเปลี่ยนเฟสเกิดขึ้นเนื่องจาก SPM สำหรับโพรงสั่นพ้องที่มีค่าฟิเนสส์สูง $P_t \cong (1 - R_m)P_{av}$ ดังนั้นจากความสัมพันธ์นี้แทนในสมการที่

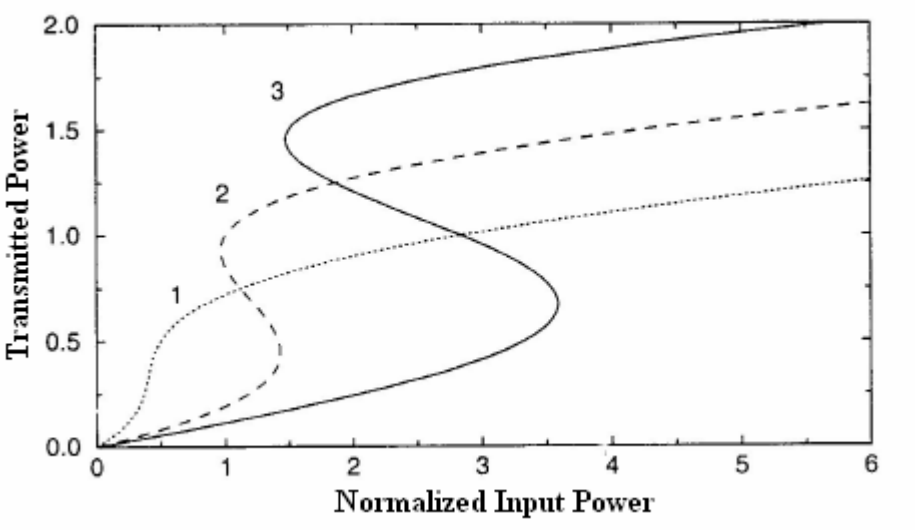
(2.25) จะได้กำลังการส่งผ่านจากสมการที่ (2.23) ที่พบว่าสอดคล้องกับสมการทรานส์เซนเดนทัล (transcendental equation) คือ

$$P_t\left\{1+\frac{4R_m}{(1-R_m)^2}\sin^2\left[\frac{\phi_0}{2}+\frac{\gamma P_t L_R}{2(1-R_m)}\right]\right\}=P_i \qquad (2.34)$$

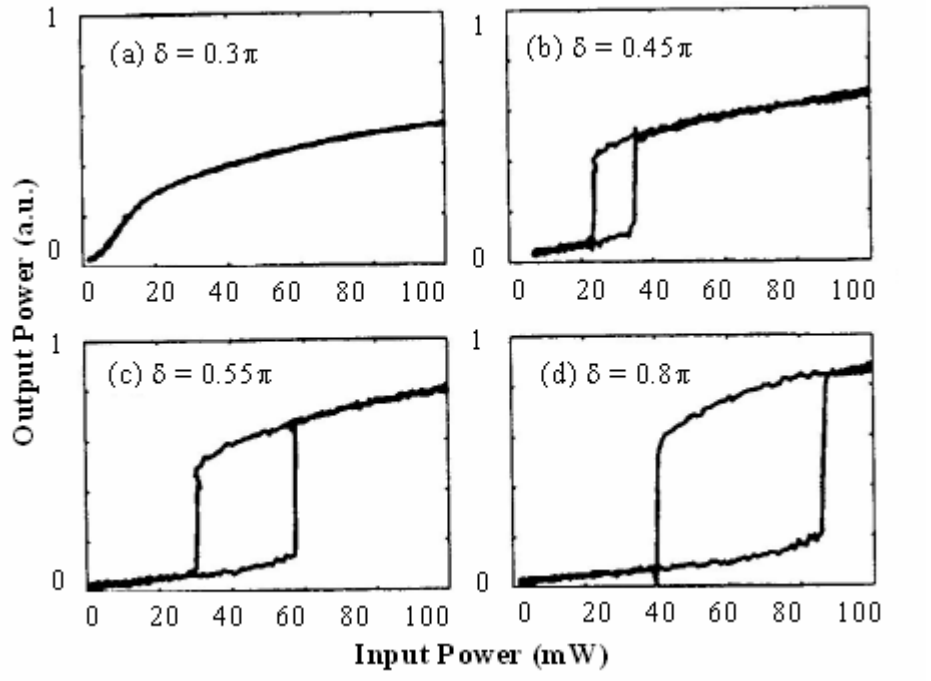
จากสมการที่ (2.34) นี้เป็นการยืนยันว่าค่า P_t มีหลายค่าที่เป็นไปได้ที่ค่ากำลังแสงตกกระทบ P_i คงที่ เพราะว่า SPM เส้นประในรูปที่ 2.5 แสดงว่า ϕ_R ที่เป็นฟังก์ชันของ ϕ_0 สำหรับ P_i 2 ค่า โดยใช้สมการที่ (2.22) จุดที่ตัดกันของเส้นประกับเส้นกราฟเส้นหนาจะสอดคล้องกับผลเฉลยของสมการที่ (2.34) หลายค่า ที่กำลังอินพุตต่ำเส้นประจะอยู่ใกล้แกน y ในแนวตั้งและจะมี 1 ผลเฉลยที่เป็นไปได้ การเพิ่มระดับกำลังอินพุตเส้นประนี้จะเอียงและจำนวนผลเฉลยจะเพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 3 ผลเฉลย และเป็น 5 ผลเฉลยและมากกว่า (เพิ่มตามระดับกำลังอินพุต) พิจารณาในกรณีผลเฉลย 3 ค่าเนื่องจากต้องการระดับกำลังอินพุตที่เป็นค่าต่ำสุด

ผลเฉลยของสมการที่ (2.34) หลายค่านำไปสู่ไบสเตบิลิตีเชิงแสงแบบการกระเจิง (Dispersive optical bistability) นั่นคือปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นสามารถสังเกตได้โดยใช้ตัวกลางแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่แตกต่างกันหลายตัวกลาง ปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดขึ้นในโพรงสั่นพ้องแบบวง-แหวนใยแก้วนำแสงเมื่อการเปลี่ยนเฟสแบบเชิงเส้น ϕ_0 ไม่สอดคล้องกับการสั่นพ้องของโพรงสั่นพ้องดังนั้นแสงมีความเข้มต่ำ (Little light) เป็นการส่งผ่านที่ระดับกำลังแสงอินพุตต่ำสำหรับการเกิดขึ้นที่ไม่ใช่การสั่นพ้อง (Detune) กำหนดให้ $\delta = 2\pi M - \phi_0$ ของสัญญาณอินพุตจากการสั่นพ้องที่ M^{th} ที่ใกล้ที่สุด การเปลี่ยนเฟสที่เกิดจาก SPM จะลด detuning สุทธิจนเป็นศูนย์ซึ่งเป็นผลในการส่งผ่านที่ระดับสูงกว่า (Higher transmission) แต่อย่างไรก็ตามกำลังการส่งผ่าน P_t จะไม่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นโดยตรงกับ P_0 ที่เกิดจากธรรมชาติที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear nature) ของสมการที่ (2.34)

รูปที่ 2.10 แสดงพฤติกรรมที่คาดการณ์สำหรับค่า δ 3 ค่าตลอดช่วงที่แน่นอนของ δ ผลเฉลย 3 ค่าของสมการที่ (2.34) ที่เป็นลักษณะเส้นโค้งรูปตัวเอสสอดคล้องกับไบสเตบิลิตีเชิงแสง เส้นตรงกลางมีความชันเป็นลบคือส่วนที่ไม่เสถียรเสมอส่งผลให้กำลังการส่งผ่านกระโดดขึ้น-ลงที่ค่า P_i จำเพาะในลักษณะฮิสเตอรีซีสลูป กำลังสวิตชิงที่เป็นอันดับของ $(\gamma L_R)^{-1}$ ด้วยค่าเชิงตัวเลขประมาณ 10 วัตต์สำหรับ L_R ประมาณ 100 เมตร



รูปที่ 2.10 การตอบสนองไบสเตเบิลของโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสง ด้วย R_m = 0.8 สำหรับ δ 3 ค่า กำลังแสงเป็นการนอร์มอไลซ์โดยใช้ $P_n = (\gamma L_R)^{-1}$.



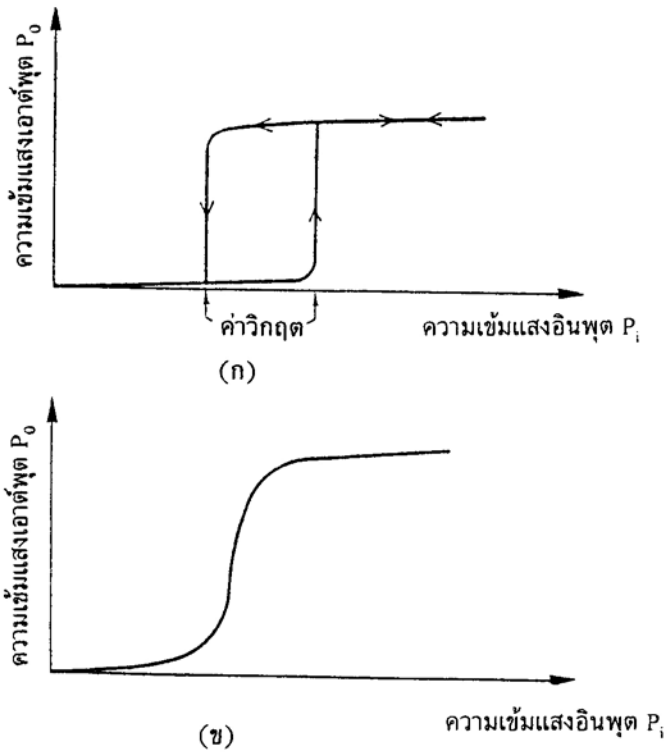
รูปที่ 2.11 วัฏจักรฮิสเตอรีซีสที่พบในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงที่ δ 4 ค่า

การสังเกตจากการทดลองไบสเตบิลิตีเชิงแสงโดยใช้ลำแสง CW ที่สัมพันธ์กับค่าขีดเริ่มต่ำของ SBS ในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสง การเกิดไบสเตบิลิตีในวงแหวนใยแก้วนำแสงครั้งแรกเป็นการทดลองในปี ค.ศ. 1983 [10] ซึ่งเป็น SBS โดยการวาง optical isolator ภายในแควิตีแบบวง-แหวนที่เป็นใยแก้วนำแสงที่มีไบร์ฟริงเจนซ์ต่ำยาว 13 เมตร พฤติกรรมไบสเตเบิลเป็นการ

พบในการทดลองนี้ที่ระดับกำลัง CW ต่ำกว่า 10 มิลลิวัตต์ การปลี่ยนเฟสแบบไม่เป็นเชิงเส้น ϕ_{NL} ที่ระดับกำลังนี้ (< 10mW) ซึ่งเป็นกำลังที่มีขนาดน้อยมากแต่ก็เป็นค่าที่มากพอสำหรับการเกิดไบสเตบิลิตีเชิงแสง

2.8 สิ่งประดิษฐ์ออปติคัลไบสเตเบิล (Optical Bistable Device)

สิ่งประดิษฐ์ออปติคัลไบสเตเบิล [21] คือสิ่งประดิษฐ์ที่เมื่อมีแสงอินพุตความเข้มต่ำๆ (อาจต่ำระดับ พิโกจูล) ส่องเข้ามาจะทำให้เกิดแสงเอาท์พุตที่มีความเข้มแตกต่างกันออกมา กล่าวคือ จะทำให้แสงเอาท์พุตมีความเข้ม 2 ระดับ สามารถนำไปใช้งานเป็นสวิตซิงเกต (switching gate) ชนิด AND หรือ OR ได้ ลักษณะสมบัติของสิ่งประดิษฐ์ออปติคัลไบสเตเบิลมี 2 ชนิดดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



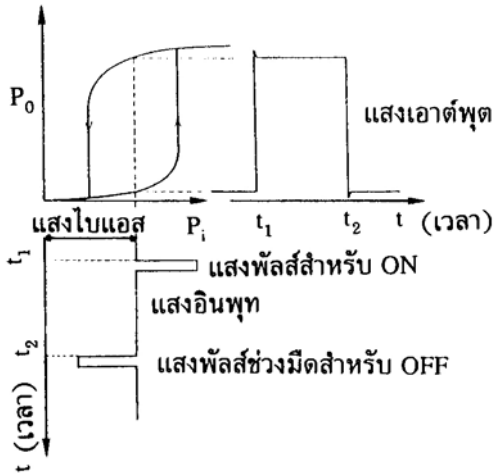
รูปที่ 2.12 ลักษณะสมบัติหลักของสิ่งประดิษฐ์ออปติคัลไบสเตเบิลซึ่งมี 2 ชนิด โดยที่
(ก) ชนิดฮีสเตอรีซีส และ
(ข) ชนิดดิฟเฟอเรนเชียลเกน

(1) สิ่งประดิษฐ์ออปติคัลไบสเตเบิลชนิดฮีสเตอรีซีส (Hysteresis type) ในสิ่งประดิษฐ์ชนิดนี้เมื่อมีแสงอินพุตเข้ามาจะทำให้แสงเอาท์พุตมี 2 สภาพ คือ สภาพความเข้มสูงและสภาพ

ความเข้มต่ำ และแสงเอาท์พุตมีลักษณะสวิตชิงแบบไม่ต่อเนื่องและมีลักษณะสมบัติแบบฮิสเตอรีซีส

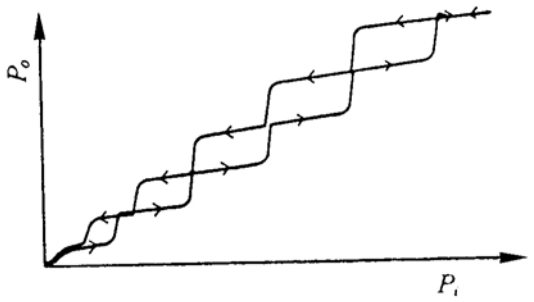
(2) สิ่งประดิษฐ์ออปติคัลไบสเตเบิลชนิดดิฟเฟอเรนเชียลเกน (Differential Gain type) ในสิ่งประดิษฐ์ชนิดนี้ความเข้มของแสงเอาท์พุตจะมีค่าแตกต่างกันมากน้อยตามระดับความเข้มแสงของแสงอินพุต

จากคุณสมบัติพิเศษที่น่าสนใจเหล่านี้ของสิ่งประดิษฐ์ออปติคัลไบสเตเบิล จึงได้มีการนำไปใช้งานมากมายเช่น มีกรใช้ชนิดฮิสเตอรีซีสเป็นหน่วยความจำ และเป็นออปติคัลสวิตช์ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งเป็นออปติคัลฟลิปฟลอป (Optical flip flop) ชนิดหนึ่ง ในการใช้งานจะมีแสงไบแอสเพื่อให้แสงอินพุตมีความเข้มเป็นครึ่งหนึ่งของลูปในกราฟฮีสเตอรีซีส ต่อจากนั้นเมื่อต้องการให้แสงเอาท์พุตเป็นสภาพ on ก็จะยิงแสงอินพุตพัลส์เข้าไปและแสงเอาท์พุตจะอยู่ในสภาพ on ตลอดไป การเปลี่ยนให้แสงเอาท์พุตเป็นสภาพ off ทำได้ด้วยการตัดแสงไบแอสชั่วขณะ (Dark light pulse)



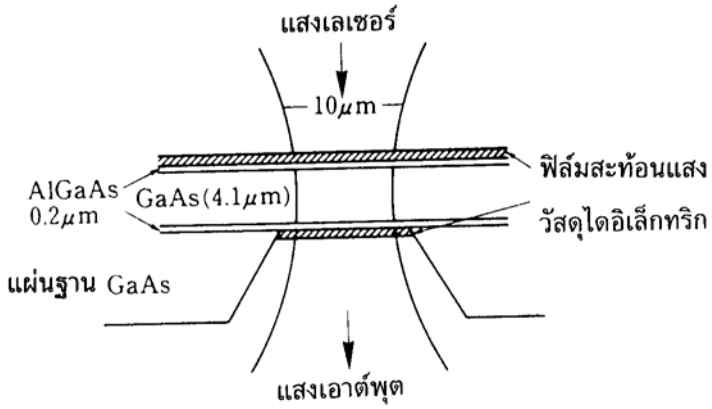
รูปที่ 2.13 ตัวอย่างการใช้งานออปติคัลไบสเตเบิลชนิดฮีสเตอรีซีสเป็นออปติคัลสวิตช์ ในรูปนี้เป็นการทำงานในลักษณะออปติคัลฟลิปฟลอปชนิดหนึ่ง

ทางด้านการใช้งานสิ่งประดิษฐ์ออปติคัลไบสเตเบิลชนิดดิฟเฟอเรนเชียลเกนนั้น มีการใช้งานเป็นเครื่องเปลี่ยนสัญญาณแสงชนิดอะนาลอกให้เป็นสัญญาณชนิดดิจิตอลจำนวน 2 หลัก (Digit) หรืออาจเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณดิจิตอลแบบหลายหลักก็ได้ ซึ่งเรียกว่าเป็นการทำงานแบบมัลติสเตเบิล (Multistable operation) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ต่อไปจะยกตัวอย่างสิ่งประดิษฐ์ออปติคัลไบสเตเบิลที่มีการพัฒนาขึ้นมาใช้แล้วดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างการใช้งานออปติคัลไบสเตเบิลชนิดดิฟเฟอเรนเชียล เป็นตัวเปลี่ยนสัญญาณแสงชนิดอะนาลอกให้เป็นสัญญาณดิจิตอลจำนวนหลายดิจิตอล ซึ่งเรียกว่าเป็นการทำงานแบบมัลติสเตเบิล

1) สิ่งประดิษฐ์ออปติคัลไบสเตเบิลชนิดใช้วัสดุไม่เชิงเส้นทางแสง

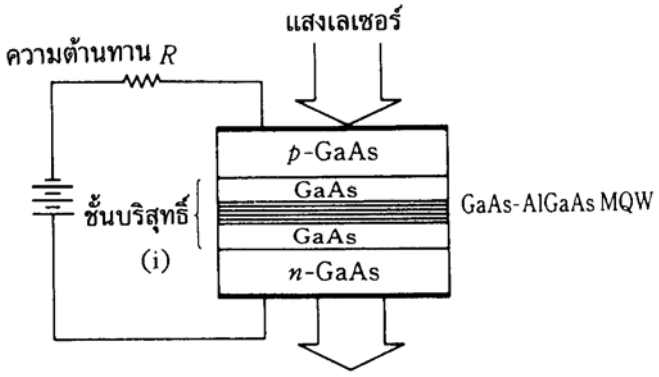


รูปที่ 2.15 ตัวอย่างโครงสร้างสิ่งประดิษฐ์ออปติคัลไบสเตเบิลชนิดที่ผลิตจากวัสดุไม่เชิงเส้นทางแสง (ฟิล์มบางของผลึก GaAs)

รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์ออปติคัลไบสเตเบิลที่ใช้ผลึกฟิล์มของ GaAs เป็นวัสดุไม่เชิงเส้นทางแสงที่ถูกพัฒนาขึ้นใน ค.ศ. 1979 ที่ด้านบนและด้านล่างมีฟิล์มสะท้อนแสงประกบติดอยู่ในลักษณะของออปติคัลเรโซเนเตอร์ชนิดหนึ่ง ถ้าแสงอินพุตที่ส่องเข้ามามีความเข้มต่ำ แสงนั้นจะไม่ทะลุผ่านผลึก แต่ถ้าแสงอินพุตมีความเข้มเกินระดับหนึ่งจะทำให้ดัชนีหักเหของ GaAs เปลี่ยนแปลงไป และแสงนั้นจะวิ่งทะลุไปได้และไปสะท้อนที่กระจกสะท้อนแสงกลับไปกลับมาแบบมีการป้อนกลับจึงทำให้แสงเอาท์พุตมีความเข้มแสงสูงมาก นอกจากผลึก GaAs อาจจะใช้ผลึกของ InSb CdS ก็ได้

2) สิ่งประดิษฐ์ออปติคัลไบสเตเบิลชนิดใช้โฟโตไดโอด

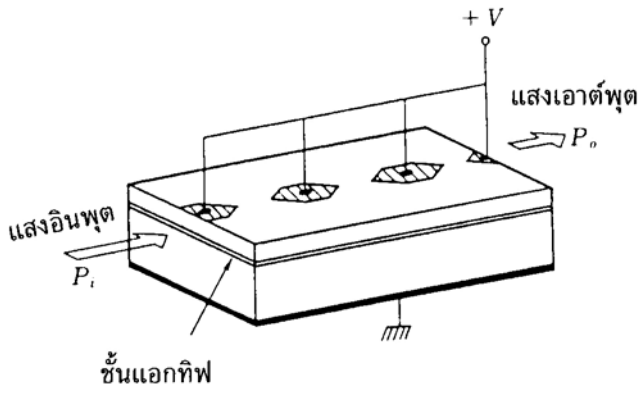
ตามปกติโฟโตไดโอดจะให้กระแสไฟฟ้าเอาท์พุตออกมาเมื่อถูกส่องด้วยแสง ต่อมาได้มีการคิดค้นดัดแปลงประยุกต์โฟโตไดโอดให้สามารถทำงานเป็นสิ่งประดิษฐ์ออปติคัลไบสเตเบิล ดังแสดงโครงสร้างในรูปที่ 2.16 ซึ่งประกอบด้วยรอยต่อ p-i-n และชั้น i ผลิตจากฟิล์มบางของผลึก GaAs สลับกับ AlGaAs หลายๆชั้นในลักษณะของมัลติควอนตัมเวลล์ แต่ละชั้นมีความหนาเพียงประมาณ 100 A° ในโครงสร้างเช่นนี้ความสามารถในการทะลุผ่านของแสงจะแปรเปลี่ยนตามขนาดของแรงดันไบแอสจากภายนอก เมื่อมีแสงอินพุตจะทำให้เกิดกระแสโฟโตไหลผ่านตัวต้านทาน R และปริมาณของกระแสโฟโตจะมีผลทำให้สนามไฟฟ้าคร่อมโฟโตไดโอดเปลี่ยนแปลงไป และความสามารถในการทะลุผ่านของแสงจะเปลี่ยนไปด้วย จึงเกิดเป็นการป้อนกลับชนิดหนึ่ง และเป็นการทำงานแบบออปติคัลไบสเตเบิล สิ่งประดิษฐ์นี้มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า SEED (Self-Electro-optic-Effect-Device)



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างโครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์ออปติคัลไบสเตเบิลชนิดประกอบด้วยโฟโตไดโอด ในรูปนี้โฟโตไดโอดประกอยด้วยรอยต่อ รอยต่อ p-i-n และชั้น i นั้นมีลักษณะเป็นมัลติ-ควอนตัมเวลล์ของ GaAs/AlGaAs สิ่งประดิษฐ์นี้มีเรียกว่า SEED

3) สิ่งประดิษฐ์ออปติคัลไบสเตเบิลชนิดใช้เลเซอร์ไดโอด

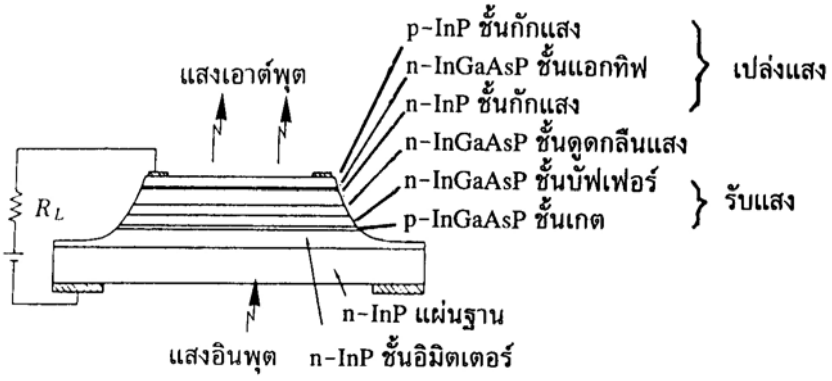
สิ่งประดิษฐ์ชนิดนี้มีโครงสร้างดังที่แสดงในรูปที่ 2.17 บนแผ่นฐานร่วมกันนั้นจะมีเลเซอร์ไดโอดอยู่จำนวนหลาย ด้านล่างเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม ดังนั้นการเปล่งแสงจะเกิดเฉพาะที่เลเซอร์ไดโอดจุดที่มีขั้วไฟฟ้าด้านบน ส่วนบริเวณที่ไม่มีขั้วนั้นจะอนุญาตให้แสงผ่านไปได้ โดยที่ความสามารถในการวิ่งทะลุผ่านของแสงนั้นจะมีค่าน้อยมากเท่าไรสามารถควบคุมได้ด้วยความเข้มของแสงเลเซอร์ และความสามารถในการวิ่งทะลุผ่านของแสงจะขึ้นกับความเข้มของแสงเลเซอร์ในลักษณะไม่เชิงเส้น นอกจากนี้ที่ด้านข้างทั้งสองจะมีฟิล์มสะท้อนแสงทำให้เกิดการย้อนกลับและกลายเป็นการทำงานแบบออปติคัลไบสเตเบิลได้



รูปที่ 2.17 สิ่งประดิษฐ์ออปติคัลไบสเตเบิลชนิดประกอบด้วยเลเซอร์ไดโอด บริเวณเส้นแสดงบริเวณที่เป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับฉีดพาหะให้เปล่งแสง

4) สิ่งประดิษฐ์ออปติคัลไบสเตเบิลชนิดใช้โฟโตทรานซิสเตอร์และไดโอดเปล่งแสง

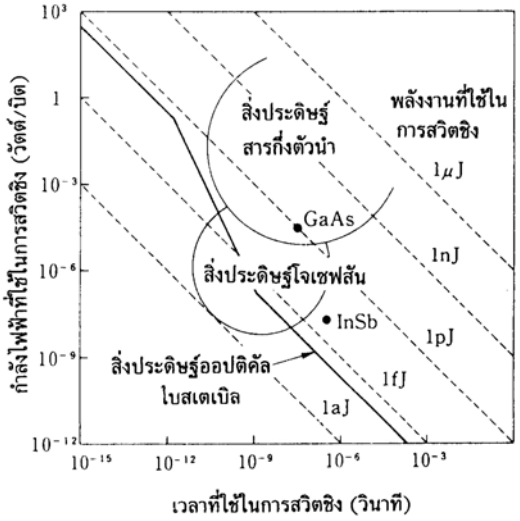
รูปที่ 2.18 แสดงโครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์ออปติคัลไบสเตเบิลที่ใช้โฟโตทรานซิสเตอร์และไดโอดเปล่งแสง ในสิ่งประดิษฐ์นี้ LED ถูกปลูกซ้อนทับบนโฟโตทรานซิสเตอร์ แสงจาก LED จะถูกป้อนกลับไปให้โฟโตทรานซิสเตอร์ ทำให้แสงเอาท์พุตมีคุณสมบัติแบบไบสเตเบิล อาจใช้เลเซอร์ไดโอดแบบเปล่งแสงเต็มผิวแทน LED ก็ได้



รูปที่ 2.18 สิ่งประดิษฐ์ออปติคัลไบสเตเบิลชนิดประกอบด้วยโฟโตทรานซิสเตอร์และไดโอดเปล่งแสงที่ซ้อนทับกัน

ถ้าจะเปรียบเทียบสมรรถนะในการทำงานของออปติคัลไบสเตเบิลและสิ่งประดิษฐ์สวิตชิงอื่นๆ จะได้ดังแสดงในรูปที่ 2.19 เส้นทึบแสดงขอบเขตขีดความสามารถของออปติคัลไบสเตเบิล จุดดำ

แสดงข้อมูลปัจจุบัน จากรูปนี้ทำให้ทราบว่าถ้าพิจารณาพลังงานที่ใช้ในการสวิตซ์ (switching energy) จะพบว่าออปติคัลไบสเตเบิลใช้พลังงานมากกว่าสิ่งประดิษฐ์โจเซฟสัน (ซึ่งเป็นซูเปอร์คอนดักเตอร์ชนิดหนึ่ง) แต่ความเร็วในการสวิตซ์ของสิ่งประดิษฐ์ออปติคัลไบสเตเบิลเร็วกว่ามาก (ระดับพิโกวินาที)



รูปที่ 2.19 เปรียบเทียบเวลาและกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทำสวิตชิงของสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ เช่น สิ่งประ-
ดิษฐ์ออปติคัลไบสเตเบิล สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ และสิ่งประดิษฐ์โจเซฟสัน

2.9 พลวัตแบบไม่เป็นเชิงเส้นและเคออส (Nonlinear Dynamics and Chaos)

การเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดและรวดเร็วในระบบไม่เป็นเชิงเส้นอาจจะเกิดจากพฤติกรรมที่ซับซ้อนเรียกว่า “เคออส” chaos เป็นคำนามและ chaotic เป็นคำคุณศัพท์ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมเวลาของระบบเมื่อพฤติกรรมไม่เป็นแบบคาบเวลา (ไม่กลับมาซ้ำค่าเดิม) และเป็นแบบสุ่มที่ชัดเจนหรือการรบกวน ในความเป็นจริงแล้วระบบจะเป็นการศึกษาเชิงกำหนดที่สมบูรณ์ โดยทั่วไปต้องประกอบด้วย 3 เงื่อนไขในการกำหนดพฤติกรรมของระบบ คือ

1) สมการวิวัฒนาการตามเวลา
2) ค่าพารามิเตอร์ที่อธิบายระบบ
3) เงื่อนไขเริ่มต้น

ระบบจะกล่าวได้ว่าเป็นเชิงกำหนดถ้าเรารู้สมการวิวัฒนาการตามเวลา พารามิเตอร์ที่อธิบายระบบ และเงื่อนไขเริ่มต้น (เช่น ตำแหน่ง x และความเร็ว dx/dt ที่ t=0) ในหลักการเชิงกำหนดที่สมบูรณ์ตามลำดับพฤติกรรมของระบบ ทุกระบบเคออสเป็น nonlinear แต่ทุกระบบ nonlinear จะไม่ใช่เคออส

การศึกษาพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้น เรียกว่า “พลวัตแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear dynamics)”

2.9.1 พลวัตแบบไม่เป็นเชิงเส้นและเคออสในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวน

การค้นพบพลวัตแบบไม่เป็นเชิงเส้นและเคออสในปี ค.ศ. 1979 ที่เป็นการตอบสนองแบบไม่เป็นเชิงเส้นของโพรงสั่นพ้องแบวงแหวนที่มี initiate a period-doubling เปลี่ยนไปเป็นเคออสเชิงแสง อุ-ดมคติพื้นฐานประกอบด้วยพลวัตในแคิวีตีแบบวงแหวนที่สอดคล้องกับแมป (map) ไม่เป็นเชิงเส้นของการตอบสนองภายในแคิวีตี ในทางคณิตศาสตร์แมปสามารถเขียนได้เป็น

$$A^{(n+1)}(0,t) = \sqrt{\rho}A^{(n)}\left(L_R,t\right)\exp(i\phi_0) + i\sqrt{(1-\rho)}P_i \qquad (2.35)$$

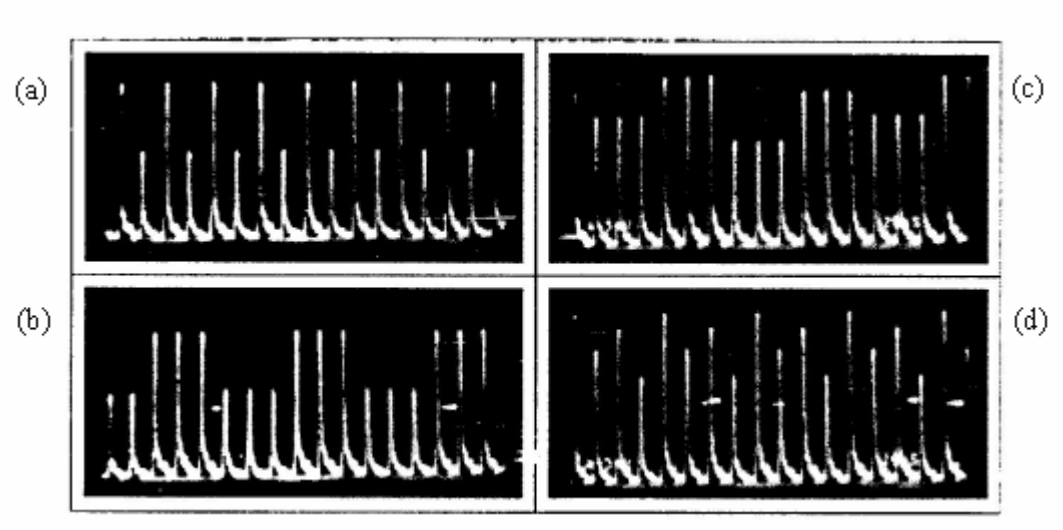
เมื่อตัวยกกำลังแทนจำนวนการวนรอบภายในวงแหวนใยแก้วนำแสงและ ρ แทนสัดส่วนของกำลังที่ยังเหลือในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนหลังจากผ่านคัปเปลอร์ใยแก้วนำแสง วิวัฒนาการของสนามในวงแหวนใยแก้วนำแสง A(z,t) ระหว่างในแต่ละการวนรอบโดยใช้สมการชโรดิงเจอร์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (NLS) คือ

$$i\frac{\partial A}{\partial z} - \frac{\beta_2}{2}\frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \gamma\left|A\right|^2 A = 0 \qquad (2.36)$$

เมื่อ $T = t - z/\upsilon_g$ คือเวลาที่ลดลง (reduced time) และ β_2 คือ พารามิเตอร์ของ GVD ถ้าผลของ GVD นั้นสามารถตัดทิ้งได้ในสภาวะของ CW หรือสภาวะ quasi-CW สมการนี้สามารถแก้เชิงวิเคราะห์เพื่อหาผลลัพธ์ง่ายๆ คือ

$$A(L_R,t) = A(0,t)\exp\left[i\gamma\left|A(0,t)\right|^2 L_R\right]. \qquad (2.37)$$

ใช้สมการที่ (2.37) แทนในสมการที่ (2.35) แมปไม่เป็นเชิงเส้นสามารถวนซ้ำสำหรับการกำหนดค่ากำลังแสงอินพุต P_i ผลลัพธ์ที่ได้แสดงว่าเอาท์พุตของโพรงสั่นพ้องแบวงแหวนใยแก้วนำแสงนั้นจะขึ้นกับเวลาเสมอสำหรับอินพุต CW นอกจากนี้แล้วเอาท์พุตจะกลายเป็นสภาวะเคออสตามการเกิด period-doubling ในช่วงพารามิเตอร์อินพุตที่แน่นอน พฤติกรรมนี้พบในการทดลองในปี ค.ศ. 1983 โดยการส่งพัลส์ 140 พิโกวินาที (หาได้จาก Q-สวิตซ์ mode-locked Nd:YAG laser) เข้าไปในแคิวีตีแบบวงแหวนใยแก้วนำแสง ความยาวแคิวีตีต้องเลือกให้สอดคล้องกับเวลาการวนรอบ 7.6 นาโนวินาทีช่วงระหว่างพัลส์ที่ใกล้ชิดกันที่แน่นอน (การปั๊มแบบซิงโครนัส)



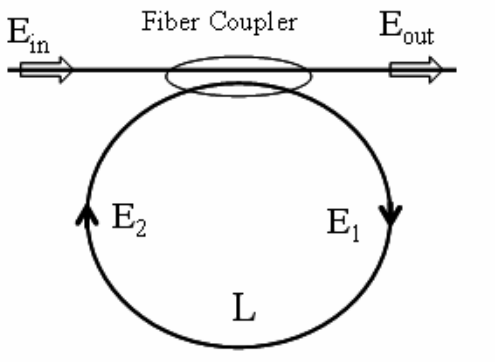
รูปที่ 2.20 รูปแบบ 2 คาบที่เกิดขึ้นสำหรับ $\delta = 0.35\pi$ ที่ระดับกำลังอินพุตเฉลี่ย (a) 200 mW และ (b) 250 mW. รูปแบบ 2 คาบจะเปลี่ยนเป็นแบบ 4 คาบสำหรับ $\delta = 0.65\pi$ [(c) และ (d)] ที่ระดับกำลังอินเฉลี่ยเดียวกัน

การทดลองในปี ค.ศ. 1998 ใช้เลอเซอร์โหมดล็อคชนิด Ti:sapphire ที่มีพัลส์แคบๆ (ความกว้างพัลส์ ~1 ps) ส่งเข้าไปในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสง รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะรูปแบบ 2-คาบ และ 4-คาบที่ได้จากการใช้ค่า detuning ที่แตกต่างกัน 2 ค่าที่ระดับกำลังแสงอินพุตต่างกัน ที่ระดับกำลังแสงอินพุตสูงเอาท์พุตที่ได้จะกลายเป็นเคออสตลอดช่วงกว้างของค่า detuning δ เป็นแบบ 3-คาบซึ่งลักษณะเช่นนี้เป็นไปตามทฤษฎีระบบพลวัตแบบไม่เป็นเชิงเส้นโดยทั่วไป

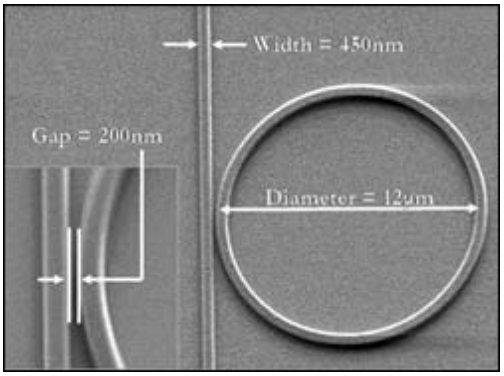
2.10 โครงสร้างโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสง

โครงสร้างของโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสง [13] โดยทั่วไปสามารถแบ่งตามลักษณะการเชื่อมต่อกับคัปเปลอร์ใยแก้วนำแสงออกเป็น 2 แบบ คือ

แบบที่ 1 การเชื่อมต่อคัปเปลอร์แบบการรวมตรง (Direct-coupled connect)

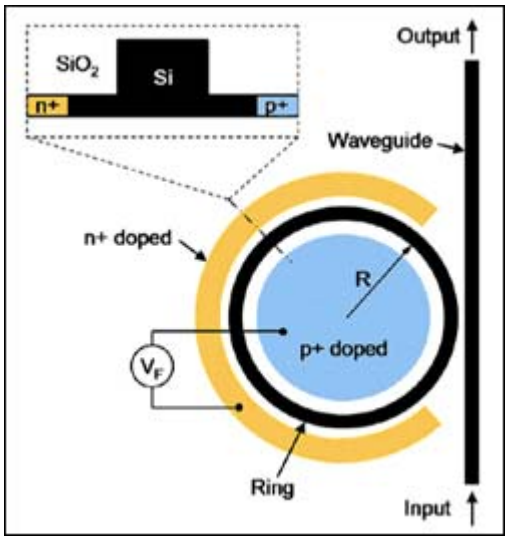


(ก) วงจรเสมือนของอุปกรณ์แยกแสงโพงสั่นพ้องขนาดเล็ก



(ข) ภาพถ่ายจากกล้องขยายภาพจริงของอุปกรณ์แยกแสงโพงสั่นพ้องขนาดเล็ก

ที่มา : Cornell Nanophotonics Group Copyright © Cornell University



(ค) โครงสร้างของอุปกรณ์แยกแสงโพงสั่นพ้องขนาดเล็ก

ที่มา : Cornell Nanophotonics Group Copyright © Cornell University

รูปที่ 2.21 โครงสร้างโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงที่เชื่อมต่อด้วยคัปเปลอร์แบบการรวม- ตรง

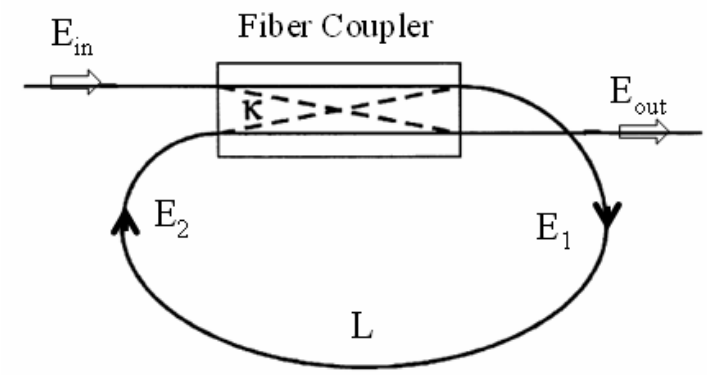
พิจารณาสนามไฟฟ้าทางแสงที่ประกอบด้วยสนามอินพุต E_{in} และสนามส่วนการวนรอบภายในวงแหวนใยแก้วนำแสง E_2 สามารถเขียนได้เป็น

$$E_1 = \sqrt{1-\kappa}E_2 + i\sqrt{\kappa}E_{in} \quad (2.38)$$

$$E_{out} = \sqrt{1-\kappa}E_{in} + i\sqrt{\kappa}E_2 \quad (2.39)$$

เมื่อ $$E_2 = E_1 e^{-\alpha L/2} e^{i\phi} \quad (2.40)$$

แบบที่ 2 การเชื่อมต่อคัปเปลอร์แบบการรวมตรงข้าม (cross-coupled connect)



รูปที่ 2.22 โครงสร้างโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงที่เชื่อมต่อด้วยคัปเปลอร์แบบการรวมตรงข้าม

พิจารณาสนามไฟฟ้าทางแสงที่ประกอบด้วยสนามอินพุต E_{in} และสนามส่วนการวนรอบภายในวงแหวนใยแก้วนำแสง E_2 สามารถเขียนได้เป็น

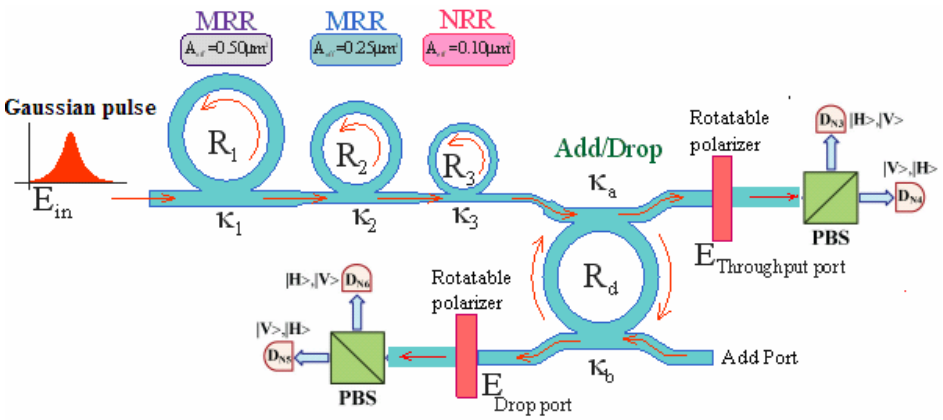
$$E_1 = \sqrt{\kappa}E_2 + i\sqrt{1-\kappa}E_{in} \quad (2.41)$$

$$E_{out} = \sqrt{\kappa}E_{in} + i\sqrt{1-\kappa}E_2 \quad (2.42)$$

เมื่อ $$E_2 = E_1 e^{-\alpha L/2} e^{i\phi} \quad (2.43)$$

ในงานวิจัยนี้ใช้โพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงที่เชื่อมต่อด้วยคัปเปลอร์ใยแก้วนำแสงแบบที่ 2

2.11 การเข้ารหัสแสงแบบควอนตัม (Quantum Optical Decoder)



รูปที่ 2.23. แสดงระบบกำเนิดสัญญาณความถี่สูง(Optical high frequency carrier) และระบบกราสร้างรหัสควอนตัม (Quantum encoding system)

รูปที่ 2.23 แสดงขั้วของการส่งผ่าน (Polarization coupler) ที่ถูกแยกออกจากด้านสัญญาณแนวตั้งและสัญญาณทางแนวนอน (Vertical and Horizontal polarization states) ซึ่งอาจจะมีการเลือกสัญญาณทางแนวตั้งหรือแนวนอนก็ได้ ซึ่งอาจจะเป็นพัลส์แรก หรือพัลส์ที่ 2 ก็เป็นได้ เราอาจจะสมมติสถานะทางด้านแกนแนวตั้งหรือแนวนอนจากทางด้านโหมดเวลา คือ Δt ซึ่งเราจะได้จากสมการที่ 2.44 ดังนี้

$$\left|\Phi\right\rangle_{\mathrm{p}} = \left|1,\mathrm{H}\right\rangle_{\mathrm{s}}\left|1,\mathrm{H}\right\rangle_{\mathrm{i}} + \left|2,\mathrm{H}\right\rangle_{\mathrm{s}}\left|2,\mathrm{H}\right\rangle_{\mathrm{i}} \qquad (2.44)$$

ในสมการที่แสดงให้เห็นว่า $\left|\mathrm{k},\mathrm{H}\right\rangle,\mathrm{k}$ คือ ลำดับของช่วงเวลา (Number of time slots) (1 หรือ 2) เมื่อสถานะของขั้วแสงที่เกิดขึ้นอาจจะอยู่ในแนวนอน (Horizontal: H) หรือแนวตั้ง (Vertical: V) และ ตัวที่แสดงถึงลักษณะของสัญญาณ คือ the signal (s) หรือ สถานะที่ถูกใช้งาน (Idler (i) state) ในสมการที่ 2.44 สำหรับ เป็นสมาการทั่วไปที่ใช้ในงานวิจัย จากสัญญาณแสงที่มีขั้ว 2 ขั้วซึ่งอาจจะเป็นขั้ง H polarization ดังแสดงในสมการที่ 2.44 คือ สัญญาณขาเข้าจะทำมุมฉากกันเสมอ (Orthogonal polarization-delay circuit) แสดงในรูปที่ 2.23 ในระบบจะประกอบด้วยสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง และความแตกต่างระหว่างเวลา 1 รอบที่เดินทางผ่านอุปกรณ์โพรงสั่นพ้องขนาดเล็ก (the difference between the round-trip times of the micro ring resonator) 8คือ Δt อุปกรณ์โพรงสั่นพ้องขนาดเล็กมีมุมเอียงโดยเปลี่ยนสถานะให้กลับมาเป็นสถานะแนวแกนตั้งได้ V polarization ที่สัญญาณขาออก ซึ่ง delay circuits convert สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\left|\mathrm{k},\mathrm{H}\right\rangle \text{ to } \quad \mathrm{r}\left|\mathrm{k},\mathrm{H}\right\rangle + t_2\exp(i\phi)\left|k+1,V\right\rangle + \mathrm{rt}_2\exp(\mathrm{i}_2\phi)\left|\mathrm{k}+2,\mathrm{H}\right\rangle \quad + \quad \mathrm{r}_2\mathrm{t}_2\exp(\mathrm{i}_3\phi)\left|\mathrm{k}+3,\mathrm{V}\right\rangle$$

(2.45)

เมื่อ *t* และ *r* คือ ขนาดของสัญญาณส่ง (Amplitude transmittances to cross) และสัญญาณส่งกลับ เมื่อสมการที่ 2.45 คือ การแปลงกลับของ สถานะขั้วสัญญาณ โดยมีการหน่วงเวลา

$$\begin{aligned}\left|\Phi\right\rangle &= \left[\left|1,\mathrm{H}\right\rangle_{\mathrm{s}} + \exp(\mathrm{i}\phi_{\mathrm{s}})\left|2,\mathrm{V}\right\rangle_{\mathrm{s}}\right]\times\left[\left|1,\mathrm{H}\right\rangle_{\mathrm{i}} + \exp(\mathrm{i}\phi_{\mathrm{i}})\left|2,\mathrm{V}\right\rangle_{\mathrm{i}}\right] + \left[\left|2,\mathrm{H}\right\rangle_{\mathrm{s}} + \exp(\mathrm{i}\phi_{\mathrm{s}})\left|3,\mathrm{V}\right\rangle_{\mathrm{s}}\right] \\ &\times\left[\left|2,\mathrm{H}\right\rangle_{\mathrm{i}} + \exp(\mathrm{i}\phi_{\mathrm{i}})\left|2,\mathrm{V}\right\rangle_{\mathrm{i}}\right] \\ &= \left[\left|1,\mathrm{H}\right\rangle_{\mathrm{s}}\left|1,\mathrm{H}\right\rangle_{\mathrm{i}} + \exp(\mathrm{i}\phi_{\mathrm{i}})\left|1,\mathrm{H}\right\rangle_{\mathrm{s}}\left|2,\mathrm{V}\right\rangle_{\mathrm{i}}\right] + \exp(\mathrm{i}\phi_{\mathrm{s}})\left|2,\mathrm{V}\right\rangle_{\mathrm{s}}\left|1,\mathrm{H}\right\rangle_{\mathrm{i}} + \exp\left[\mathrm{i}(\phi_{\mathrm{s}}+\phi_{\mathrm{i}})\right]\left|2,\mathrm{V}\right\rangle_{\mathrm{s}}\left|2,\mathrm{V}\right\rangle_{\mathrm{i}} \\ &+ \left|2,\mathrm{H}\right\rangle_{\mathrm{s}}\left|2,\mathrm{H}\right\rangle_{\mathrm{i}} + \exp(\mathrm{i}\phi_{\mathrm{i}})\left|2,\mathrm{H}\right\rangle_{\mathrm{s}}\left|3,\mathrm{V}\right\rangle_{\mathrm{i}} + \exp(\mathrm{i}\phi_{\mathrm{s}})\left|3,\mathrm{V}\right\rangle_{\mathrm{s}}\left|2,\mathrm{H}\right\rangle_{\mathrm{i}} + \exp\left[\mathrm{i}(\phi_{\mathrm{s}}+\phi_{\mathrm{i}})\right]\left|3,\mathrm{V}\right\rangle_{\mathrm{s}}\left|3,\mathrm{V}\right\rangle_{\mathrm{i}}\end{aligned}$$

(2.46)

โดยการนับในช่วงเวลาที่ 2 เราสามารถยกเว้นการคิดในเทอมที่ 4 และ 5 เราจะเหลือสมการ Polarization entangled state ดังนี้

$$\left|\Phi\right\rangle = \left|2,\mathrm{H}\right\rangle_{\mathrm{s}}\left|2,\mathrm{H}\right\rangle_{\mathrm{i}} + \exp\left[\mathrm{i}(\phi_{\mathrm{s}}+\phi_{\mathrm{i}})\right]\left|2,\mathrm{V}\right\rangle_{\mathrm{s}}\left|2,\mathrm{V}\right\rangle_{\mathrm{i}} \qquad (2.47)$$

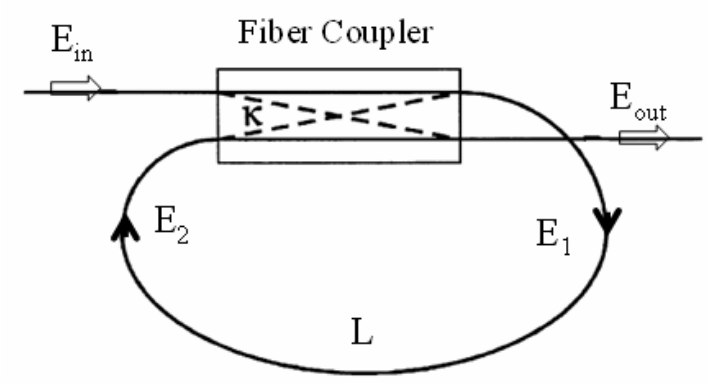
ซึ่งจะแสดงผลลัพธ์ และผลการทดลองในบทที่ 4

บทที่ 3
ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

การศึกษาปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว โดยพิจารณาปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดขึ้น ได้แก่ เคออส ไบฟูร์เคชัน ไบสเตบิลิตีเชิงแสงและอิเคดะอินสเตบิลิตีภายในโพรงสั่นพ้อง ซึ่งเป็นผลจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่จะทำการพิจารณา ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 การศึกษาโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

โพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงเกิดจากการนำใยแก้วชนิดโหมดเดียว ประกอบรวมกับคัปเปลอร์ใยแก้วนำแสง ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โมเดลโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงที่ประกอบด้วยคัปเปลอร์ใยแก้วนำแสง

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกส่งเข้าส่งเข้าทางปลายใยแก้วนำแสงด้านหนึ่งของโพรงสั่นพ้องผ่านบริเวณคัปปลิงของคัปเปลอร์ใยแก้วนำแสง คลื่นแสงถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนตามอัตราการแบ่งกำลังแสงของคัปเปลอร์ κ แสงส่วนแรกถูกส่งผ่านไปยังปลายอีกด้านของใยแก้วนำแสงเป็นสัญญาณเอาท์พุท แสงส่วนที่สองถูกส่งเข้าสู่วงแหวนซึ่งมีความยาว L แล้วจึงเดินทางผ่านเข้าสู่บริเวณคัปปลิงของคัป-เปลอร์อีกครั้ง แสงนั้นถูกส่งหมุนวนต่อไปเรื่อยๆจนกระทั่งถูกลดทอนภายในใยแก้วจนหมด

3.1.1 พลวัตแบบไม่เป็นเชิงเส้นและเคออสในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสง

สมมติว่าไม่มีการสูญเสียของคัปเปลอร์และไม่คิดการสูญเสียในใยแก้วนำแสงที่เป็นโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวน (ปกติมีการสูญเสียน้อยมากในใยแก้วนำแสงประมาณ 0.2 เดซิเบลต่อกิโลเมตร) สนามไฟฟ้า E_1 และ E_{out} ที่ประกอบด้วยสนามส่วนการส่งผ่านและสนามที่วนรอบภายในวงแหวนใย-แก้วนำแสงสามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} E_1(t) &= \sqrt{\kappa}E_2(t) + i\sqrt{1-\kappa}E_{in}(t) \\ E_{out}(t) &= \sqrt{\kappa}E_{in}(t) + i\sqrt{1-\kappa}E_2(t) \end{aligned} \tag{3.1}$$

เมื่อ κ คือ อัตราส่วนการแยกกำลังของคัปเปลอร์ นั่นคือ κ:(1-κ) โดยที่อัตราส่วนกำลังแสง κ จะถูกส่งเข้าไปในวงแหวนใยแก้วนำแสง ส่วนอัตรากำลังแสง 1-κ จะถูกส่งไปยัง E_{out} โดยตรง พิจารณาการเดินทางของสนามไฟฟ้าจาก E_1 ไปยัง E_2 ในสภาวะคงที่สามารถหาได้จากสมการเดินทางคลื่นแสงแบบไม่เป็นเชิงเส้น

$$\frac{\partial E}{\partial z} = i\frac{2\pi n_2}{A_{eff}\lambda_0}|E|^2 E \tag{3.2}$$

ทำการอินทิเกรตสมการ (3.2) จะได้ความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$E_2(t) = E_1(t)e^{i\phi} \tag{3.3}$$

โดยที่ E_1 คือ สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งแรกของวงแหวนถัดจากคัปเปลอร์
E_2 คือ สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งสุดท้ายของวงแหวนก่อนวนเข้าสู่คัปเปลอร์
E_{in} คือ สนามไฟฟ้าอินพุต
E_{out} คือ สนามไฟฟ้าเอาท์พุต

และ

$$\phi = \phi_L + \phi_{NL} \tag{3.4}$$

เมื่อ ϕ_L คือ เฟสเปลี่ยนแบบเชิงเส้น (linear phase shift) และเฟสที่เปลี่ยนไม่เป็นแบบเชิงเส้นที่วนรอบในวงแหวนใยแก้วนำแสง คือ

$$\phi_{NL} = \frac{2\pi n_2 L}{\lambda_0 A_{eff}}|E_1(t)|^2 \tag{3.5}$$

เมื่อ λ_0 คือ ความยาวคลื่นของแสงเดินทางในสุญญากาศ และ A_{eff} คือ พื้นที่ของคอร์ยังผลของใยแก้ว-นำแสง แทนสมการที่ (3.2) ในสมการที่ (3.1) และเขียนเป็นรูปแบบของสมการการวนซ้ำ (iterative equation) ที่ขึ้นกับเวลาได้เป็น

$$E_1(t) = i\sqrt{1-\kappa}E_{in} + \sqrt{\kappa}E_1(t-t_R)e^{i\phi} \tag{3.6}$$

หรือ เขียนในรูปแบบที่ง่ายขึ้น โดยให้ $A = i\sqrt{1-\kappa}E_{in}$ และ $B = \sqrt{\kappa}$

$$E_{n+1} = A + BE_n \exp\left(i\frac{2\pi n_2 L}{\lambda_0 A_{eff}}|E_n|^2 + \phi_L \right) \tag{3.7}$$

เมื่อตัวห้อย “n” แทนจำนวนการวนรอบลูปภายในวงแหวนใยแก้วนำแสง

3.1.2 ไบสเตบิลิตีเชิงแสงในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสง

พิจารณาที่สภาวะคงที่ จากสมการที่ (3.6) จะได้ว่า

$$E_1 = \sqrt{\kappa}E_1 e^{i\phi} + i\sqrt{1-\kappa}E_{in} \tag{3.8}$$

และสนามไฟฟ้าเอาท์พุตที่สภาวะคงที่

$$E_{out} = E_{in}\left[\sqrt{\kappa} + i\frac{i(1-\kappa)e^{i\phi}}{1-\sqrt{\kappa}e^{i\phi}} \right]$$

หรือ

$$\frac{E_{out}}{E_{in}} = \sqrt{\kappa} - \frac{(1-\kappa)e^{i\phi}}{1-\sqrt{\kappa}e^{i\phi}} \tag{3.9}$$

ดังนั้นจากสมการที่ (3.9) จะได้กำลังแสงหรือความเข้มแสงเป็น

$$\left|\frac{E_{out}}{E_{in}}\right|^2 = \left(\sqrt{\kappa} - \frac{(1-\kappa)e^{i\phi}}{1-\sqrt{\kappa}e^{i\phi}} \right)\cdot\left(\sqrt{\kappa} - \frac{(1-\kappa)e^{-i\phi}}{1-\sqrt{\kappa}e^{-i\phi}} \right) \tag{3.10}$$

หรือ

$$\left|\frac{E_{out}}{E_{in}}\right|^2 = \kappa - \frac{(1-\kappa)\left[\sqrt{\kappa} + (1-\kappa) \right]}{1+\kappa-2\sqrt{\kappa}\cos\phi} \tag{3.11}$$

สมการ (3.7) และ (3.11) คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพลวัตแบบไม่เป็นเชิงเส้นและเคออสและไบสเตบิลิตีเชิงแสงตามลำดับสำหรับใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้ จะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนคือ ความยาววงแหวน (L) อัตราการแบ่ง-กำลังการคัปปลิงแสง (κ) การเปลี่ยนเฟสแบบเชิงเส้นในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนดัชนีหักเหแบบ-ไม่เป็นเชิงเส้นและค่าสัญญาณอินพุต (P_{in}) ซึ่งใช้ในการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นของโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงดังจะกล่าวต่อไป

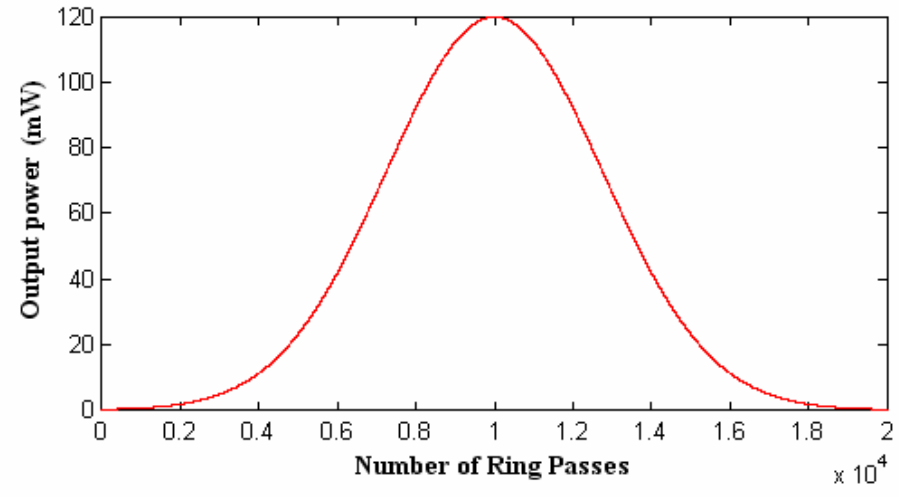
ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นของโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้ว-นำแสง โดยพิจารณาลำแสงอินพุตเป็นสัญญาณของการกระจายแบบเกาส์เซียน

$$P_{in} = P_0 \exp\left[-\left(\frac{x-y}{z}\right)^2\right] \tag{3.12}$$

โดยค่าความยาวคลื่น (λ_0)ในย่านการสื่อสารเท่ากับ 1.55×10^{-6} เมตร ดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิง-เส้น (n_2) อยู่ในช่วง $2.2-3.4\times10^{-20} m^2/W$ [8] พื้นที่หน้าของแกนใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว (A_{eff}) เท่ากับ $30\,\mu m^2$ อัตราการแบ่งกำลังการคัปปลิงแสง (κ) 0.0225 – 0.9 และรัศมีของวงแหวนใย-แก้วนำแสง (R) 10, 50, 100 ไมโครเมตร โดยจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเอาต์พุตเมื่อคลื่นแสงเดินทางวนในวงแหวนครบ 20,000 รอบ และสัญญาณเอาต์พุตจะเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของความเข้มแสง (I_t) หรือกำลังแสงเอาท์พุต (P_{out}) ตามความสัมพันธ์

$$I_{out} \propto P_{out} \propto |E_{out}|^2 \tag{3.13}$$

ในการจำลองการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในใยแก้วนำแสงนี้ กำลังแสงอินพุตที่ใช้เป็นลักษณะการกระจายแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) โดยกำหนดให้การวนลูปในโพรงสั่น-พ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงทั้งหมดจำนวน 20,000 ลูป ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ลักษณะของกำลังแสงอินพุตเป็นการกระจายแบบเกาส์เซียน ที่ปั๊มในโพรงสั่นพ้องแบบวง-แหวนใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว

จากรูปที่ 3.2 แสดงลักษณะกำลังอินพุตเป็นลักษณะการกระจายแบบเกาส์เซียนที่ใช้ปั๊มเข้าไปในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว โดยกำหนดให้กำลังแสงอินพุตเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลในช่วงของการวนลูป 10,000 ลูปแรก และหลังจากนั้นกำลังแสงอินพุตจะลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลเช่นกันในช่วงของการวนลูป 10,000 ลูปหลัง กำลังแสงอินพุตที่ใช้ปั๊มเข้าไปในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนมีค่าสูงสุด (P_{in}) เท่ากับ 120 mW

3.2 การศึกษาผลของดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น

วัตถุประสงค์ในการศึกษาขั้นตอนนี้เป็นการจำลองผลของดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้น (n_2) ของแกนใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวที่มีค่าอยู่ในช่วง 2.2×10^{-20} m^2/W – 3.4×10^{-20} m^2/W [8] ที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว โดยกำหนดให้การเปลี่ยนเฟสแบบเชิงเส้นคงที่ ($\phi_L = 0$) ความยาวของวงแหวนใยแก้ว 80 เมตร และอัตราส่วนการคัปปลิงกำลังแสง (κ) เป็น 0.0225

3.3 การศึกษาผลของดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่มีผลต่อการเกิดสวิตชิงกำลังแสง

วัตถุประสงค์ในการศึกษาขั้นตอนนี้เป็นการจำลองผลของดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้น (n_2) ของแกนใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวที่มีค่าอยู่ในช่วง 2.2×10^{-20} m^2/W – 3.4×10^{-20} m^2/W [8] ที่มีผลต่อการเกิดสวิตชิงกำลังแสง โดยกำหนดให้การเปลี่ยนเฟสแบบเชิงเส้นคงที่ ($\phi_L = 0$) ความยาวของวง-แหวนใยแก้ว 80 เมตร และอัตราส่วนการคัปปลิงกำลังแสง (κ) เป็น 0.0225

3.4 การศึกษาผลของการเปลี่ยนเฟสแบบเชิงเส้นที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น

วัตถุประสงค์ในการศึกษาขั้นตอนนี้เป็นการจำลองผลของการเปลี่ยนเฟสแบบเชิงเส้น (ϕ_L) ที่เกิดขึ้นภายในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนที่มีค่าอยู่ในช่วง $[0,2\pi]$ ที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบ-ไม่เป็นเชิงเส้นในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว โดยกำหนดให้ดัชนีหักเห-แบบไม่เป็นเชิงเส้น (n_2) เท่ากับ 3.2×10^{-20} m^2/W ความยาวของวงแหวนใยแก้ว 80 เมตร และอัตราส่วนการคัปปลิงกำลังแสง (κ) เป็น 0.0225

3.5 การศึกษาผลของอัตราส่วนการคัปปลิงกำลังแสงที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น

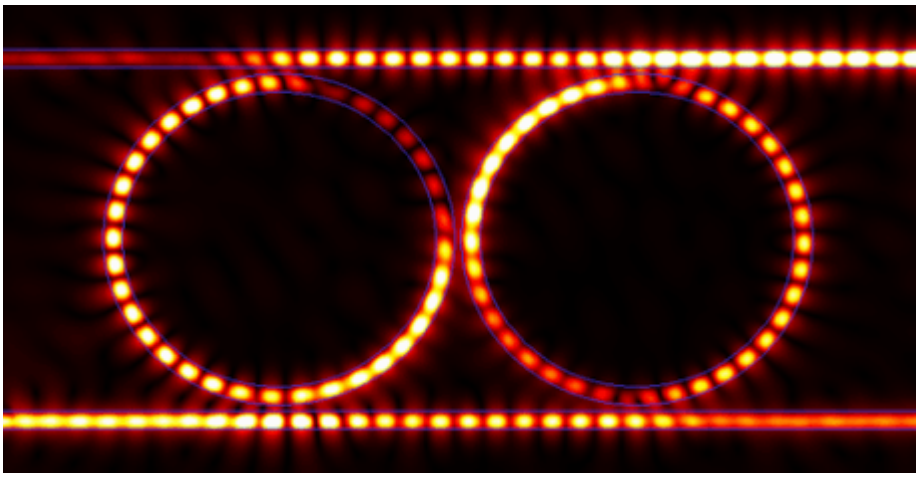
วัตถุประสงค์ในการศึกษาขั้นตอนนี้เป็นการจำลองผลของอัตราส่วนการคัปปลิงกำลังแสง (κ) ของคัปเปลอร์ใยแก้วนำแสงที่มีค่าอัตราการคัปปลิง 0.0225, 0.05, ..., 0.9 ที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว โดย

กำหนดให้ดัชนี-หักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้น (n_2) เท่ากับ 3.2 x 10^{-20} m^2/W ความยาวของวงแหวนใยแก้ว 80 เมตร และการเปลี่ยนเฟสเชิงเส้น (ϕ_L) เป็นศูนย์

3.6 การศึกษาผลของความยาวของวงแหวนที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น

วัตถุประสงค์ในการศึกษาขั้นตอนนี้เป็นการจำลองผลของความยาวของวงแหวนใยแก้วนำแสงระดับไมโครเมตรที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใย-แก้วนำแสง โดยพิจารณาที่รัศมีของวงแหวนเป็น 10 – 100 μm โดยกำหนดให้การเปลี่ยนเฟสแบบ-เชิงเส้นคงที่ (ϕ_L= 0) อัตราส่วนการคัปปลิงกำลังแสง (κ) เป็น 0.02 และดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้น n_2 = 2.69 x 10^{-17} m^2/W

3.7 การศึกษาผลของความยาวคลื่นแบบหลาย ความยาวคลื่นของวงแหวนที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น



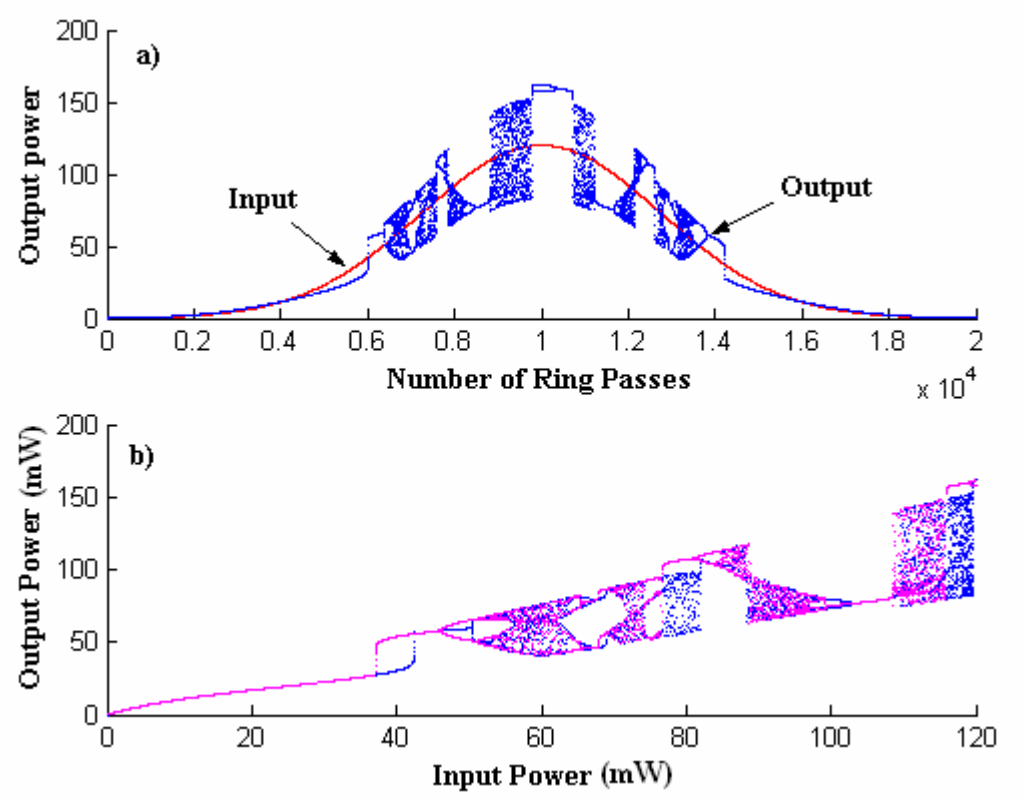
รูปที่ 3.3 แสดงการเกิดปรากฏการณ์แยกแสงแบบไม่เป็นเชิงเส้นในอุปกรณ์
ที่มา: http://www.photond.com/products/omnisim.htm

วัตถุประสงค์ในการศึกษาขั้นตอนนี้เป็นการจำลองผลของความยาวของวงแหวนใยแก้วนำแสงระดับไมโครเมตรที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใย-แก้วนำแสง โดยพิจารณาที่รัศมีของวงแหวนเป็น 5 -12 μm โดยกำหนดให้การเปลี่ยนเฟสแบบ-เชิงเส้นคงที่ (ϕ_L= 0) อัตราส่วนการคัปปลิงกำลังแสง (κ) เป็น 0.2 -0.9 และดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้น n_2 = 2.69 x 10^{-17} m^2/W

บทที่ 4
ผลการจำลองการวิจัย

ในบทนี้เป็นการจำลองผลของเอาท์พุตกำลังแสงและผลของดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น ในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงชนิดโหมด-เดี่ยว โดยกำหนดให้การเปลี่ยนเฟสแบบเชิงเส้นคงที่ ($\phi_L = 0$) ความยาวของวงแหวนใยแก้วนำแสง 80 เมตร และอัตราส่วนการคัปปลิงกำลังแสง (κ) เป็น 0.0225

4.1 เอาท์พุตกำลังแสงในระบบโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสง



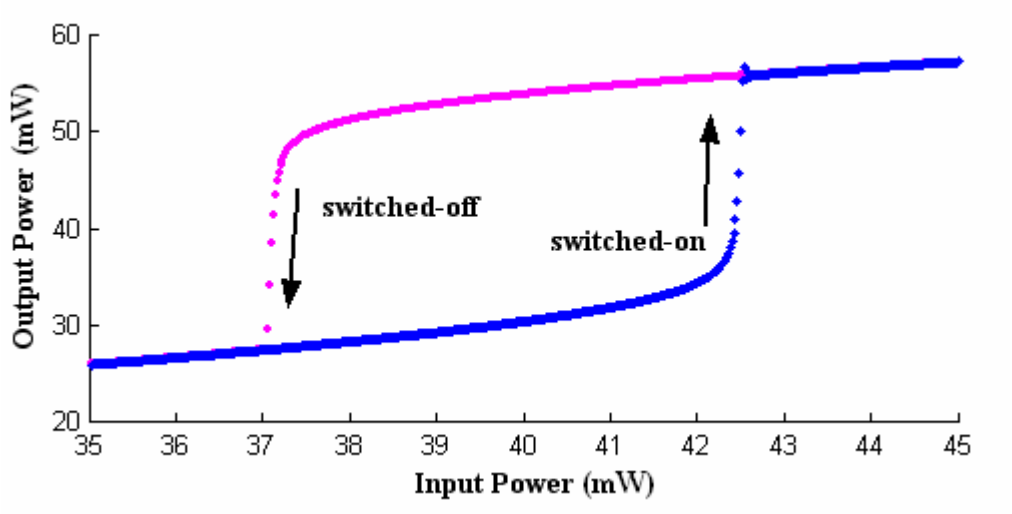
รูปที่ 4.1 ลักษณะเอาท์พุตปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสง เมื่อ $\kappa = 0.0225$ $L = 80$ เมตร $\phi_L = 0$ และ $n_2 = 3.2 \times 10^{-20}$ m^2/W

จากรูปที่ 4.1a) แสดงกราฟผลการจำลองของเอาท์พุตกำลังแสงที่เปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนการวนรอบภายในวงแหวนใยแก้วนำแสงของสมการที่ (3.7) โดยการปั๊มกำลังแสงอินพุตที่เป็นการกระจายแบบเกาส์เซียนซึ่งจะได้กำลังแสงเอาท์พุตสูงสุด 120 mW และจะเห็นว่าค่ากำลังแสงเอาท์พุตเริ่มต้นจะแปรผันตรงกับกำลังแสงอินพุตนั่นคือการเพิ่มกำลังแสงอินพุตในการวนลูปช่วงเริ่มต้นการเกิดการซ้อนทับกันของพัลส์แสงน้อยมากจนกระทั่งช่วงการวนลูปครบ 6,000 ลูป

ค่าเอาท์พุตกำลังแสงจะลดลงต่ำกว่ากำลังแสงอินพุตแล้วกลับเพิ่มขึ้นสูงกว่าค่ากำลังแสงอินพุตอย่างทันทีทันใดและให้เอาท์พุตกำลังแสง 2 ค่าเรียกลักษณะที่เกิดขึ้นเช่นนี้ว่าสวิตซ์กำลังแสง (switched-power) ขาขึ้น จนกระทั่งการวนลูปครบ 6,357 ลูป เอาท์พุตกำลังแสงกลายเป็นลักษณะของไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบ (period-2) และการวนลูปครบ 6,503 ลูป เอาท์พุตกำลังแสงของไบฟูร์เคชันกลายเป็นเคออส ในขณะที่ระดับกำลังแสงอินพุตที่มีค่าสูงสุดจนกระทั่งลดลงเป็นค่าต่ำสุดการวนลูปครบ 10,000 ลูป ค่าเอาท์พุตกำลังแสงสูงกว่ากำลังแสงอินพุตแล้วลดลงอย่างทันทีทันใดได้ค่าเอาท์พุตกำลังแสง 2 ค่าเรียกลักษณะเช่นนี้ว่าสวิตซ์-กำลังแสง (switched - power) ขาลงในช่วงการวนลูปครบ 14,214 ลูป ซึ่งการวนลูปตรงจุดนี้ค่าสวิตซ์-กำลังแสงทั้งขาขึ้นและขาลงค่าเอาท์พุตกำลังแสงจะเท่ากัน และในรูปที่ 4.1b) แสดงการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงและลักษณะปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นประกอบด้วยไบสเตบิลิตีเชิงแสง ไบฟูร์เคชัน และเคออส ซึ่งเป็นลักษณะไดอะแกรมของกำลังแสงเอาท์พุตเทียบกับกำลังแสงอินพุตที่เกิดขึ้นรูปที่ 4.1a) จะเห็นได้ว่ากำลังแสงเอาท์พุตจะไม่เกิดการแทรกสอดกับกำลังแสงอินพุตตอนเริ่มต้นจนกระทั่งกำลังแสงอินพุตเพิ่มขึ้นเป็น 37.0480 mW นั่นคือกำลังแสงเอาท์พุตจะเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นกับกำลังแสงอินพุตและที่ระดับกำลังแสงอินพุต 37.0480 mW – 42.6642 mW ลักษณะของเอาท์พุตกำลังแสงจะมีพฤติกรรมของไบสเตบิลิตีเชิงแสง (optical bistability) ระดับกำลังแสงอินพุต 40.2320 mW ลักษณะของเอาท์พุตกำลังแสงจะมีพฤติกรรมของไบฟูร์เคชัน (Bifurcation) และระดับกำลังแสงอินพุต 52.9880 mW ลักษณะของเอาท์พุตกำลังแสงจะมีพฤติกรรมของเคออส (chaos) ซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นเมื่อกำลังอินพุตเพิ่มขึ้นตามลำดับ และจะอธิบายรายละเอียดในหัวข้อ 4.1.1 – 4.1.3 ต่อไป

4.1.1 ไบสเตบิลิตีเชิงแสงในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสง

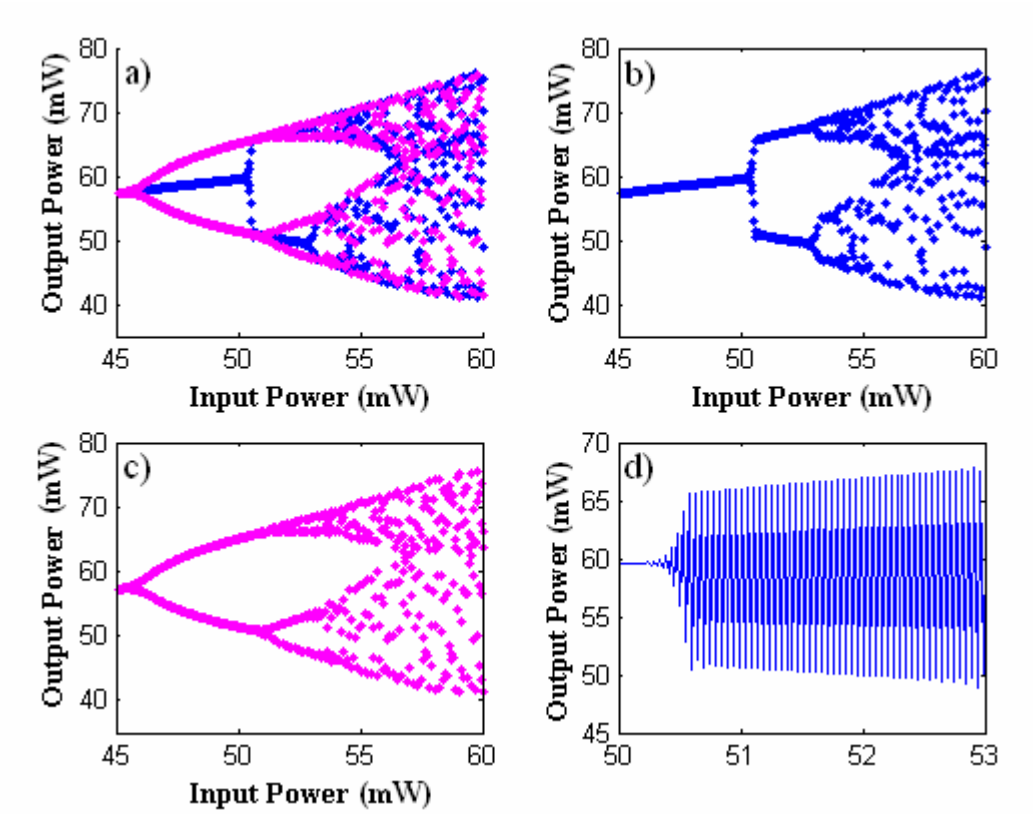
เมื่อปั๊มพัลส์แสงเข้าไปในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงที่ระดับกำลังอินพุตแสงเริ่มต้นที่ 0 mW จนกระทั่งกำลังแสงอินพุตมีค่าเท่ากับ 42.6642 mW จะทำให้ค่าเอาท์พุตกำลังแสงลดลงและเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดได้ค่าเอาท์พุตกำลังแสง 2 ค่าเอาท์พุต ซึ่งเรียกการเกิดลักษณะเช่นนี้ทางแสงว่า “สวิตซ์-เปิด” และจะเกิดเมื่อกำลังแสงอินพุตเพิ่มขึ้นเท่านั้น ทำนองเดียวกันเมื่อลดระดับกำลังแสงอินพุตจากค่าสูงสุด (120mW) มาที่ระดับกำลังแสงอินพุต 37.0480 mW ค่าเอาท์พุตกำลังแสงจะลดลงอย่างทันทีทันใดให้ค่าเอาท์พุตแสง 2 ค่า ซึ่งเรียกการเกิดลักษณะเช่นนี้ทางแสงว่า “สวิตซ์-ปิด” และจะเกิดเมื่อลดระดับกำลังแสงอินพุตเท่านั้นดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 4.2 ลักษณะการเกิดสวิตซ์-ปิดและสวิตซ์-เปิดทางแสงรวมกันเรียกการเกิด “ไบสเตบิลิตีเชิงแสง” ซึ่งลักษณะการเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างทันทีทันใดนี้เกิดเนื่องจาก cross-phase modulation ที่เกิดขึ้นในคัปเปลอร์ใยแก้วนำแสงที่มีช่วงเวลาการเกิดที่สั้นมากเมื่อเทียบกับการเกิด self-phase modulation ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในการวนรอบภายในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสง ในบริเวณการเกิดไบสเตบิลิตีเชิงแสงนี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้เป็นลอจิกเกจ [7] และสวิตซิงแสงในเครือข่ายใยแก้วนำแสง



รูปที่ 4.2 ไบสเตบิลิตีเชิงแสงที่เกิดขึ้นในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงของสมการที่ 3.11

4.1.2 ไบฟูร์เคชันในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสง

จากรูปที่ 4.3a) แสดงลักษณะของเอาท์พุตกำลังแสงเป็นไบฟูร์เคชันเมื่อระดับกำลังแสงอินพุตเพิ่มขึ้นที่ 45.3997 mW และที่ระดับกำลังแสงอินพุตนี้เรียกว่า “จุดไบฟูร์เคชัน” ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของ ไบฟูร์เคชัน เมื่อกำลังแสงอินพุตเพิ่มขึ้นเท่ากับ 45.5373 mW ลักษณะไบฟูร์เคชันจะถูกแบ่งออกเป็น 2 แขนและที่ 50.9405 mW ลักษณะไบฟูร์เคชันจะถูกแบ่งออกเป็น 2 แขนอีกครั้งหนึ่งและที่ 53.2845 mW ลักษณะไบฟูร์เคชันจะถูกแบ่งออกเป็น 2 แขนก็จะแบ่งออกเป็น 2 แขน ซึ่งจะเกิดเช่นนี้ต่อไปเรื่อยๆจึงเรียกลักษณะไบฟูร์เคชันที่เกิดขึ้นว่าเป็นแบบ 2 คาบ (Bifurcation period-2) ลักษณะไบฟูร์เคชันที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดทั้งการเพิ่มและการลดค่ากำลังแสงอินพุตดังแสดงในรูปที่ 4.3b) และ 4.3c) ตามลำดับ โดยที่การเพิ่มและลดกำลังแสงอินพุตจะให้จุดไบฟูร์เคชันต่างกัน การเพิ่มกำลังแสงอินพุตจุดไบฟูร์เค-ชันอยู่ที่ 50.2084 mW ส่วนการลดอินพุตจุดไบฟูร์เคชันอยู่ที่ 45.3997 mW โดยเป็นลักษณะของไบฟูร์-เคชันแบบ 2 คาบเช่นกัน ลักษณะไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบนี้เป็นการยืนยันได้จากลักษณะของไบฟูร์เค-ชันของพัลส์แสงดังแสดงในรูปที่ 4.3 (d)

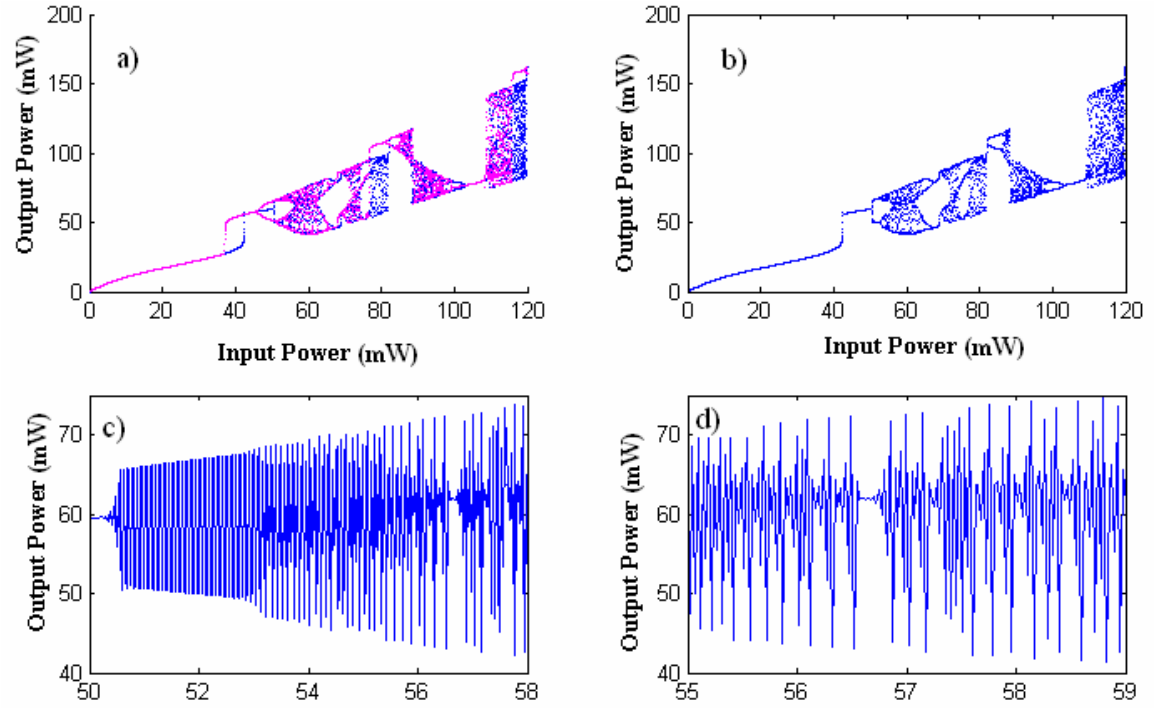


รูปที่ 4.3 ไบฟูร์เคชันไดอะแกรมของกำลังเอาท์พุตและอินพุตแสง ที่เกิดขึ้นในโพรงสั่นพ้องแบบวง-แหวนใยแก้วนำแสง เมื่อ $\kappa = 0.0225$, $\phi_L = 0$, และ $n_2 = 3.2 \times 10^{-20}$ m^2/W a) ไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบของกำลังแสงเอาท์พุต b) ไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบของกำลังแสงอินพุตที่เพิ่มขึ้น c) ไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบของกำลังแสงอินพุตที่ลดลง d) ไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบของพัลส์แสง

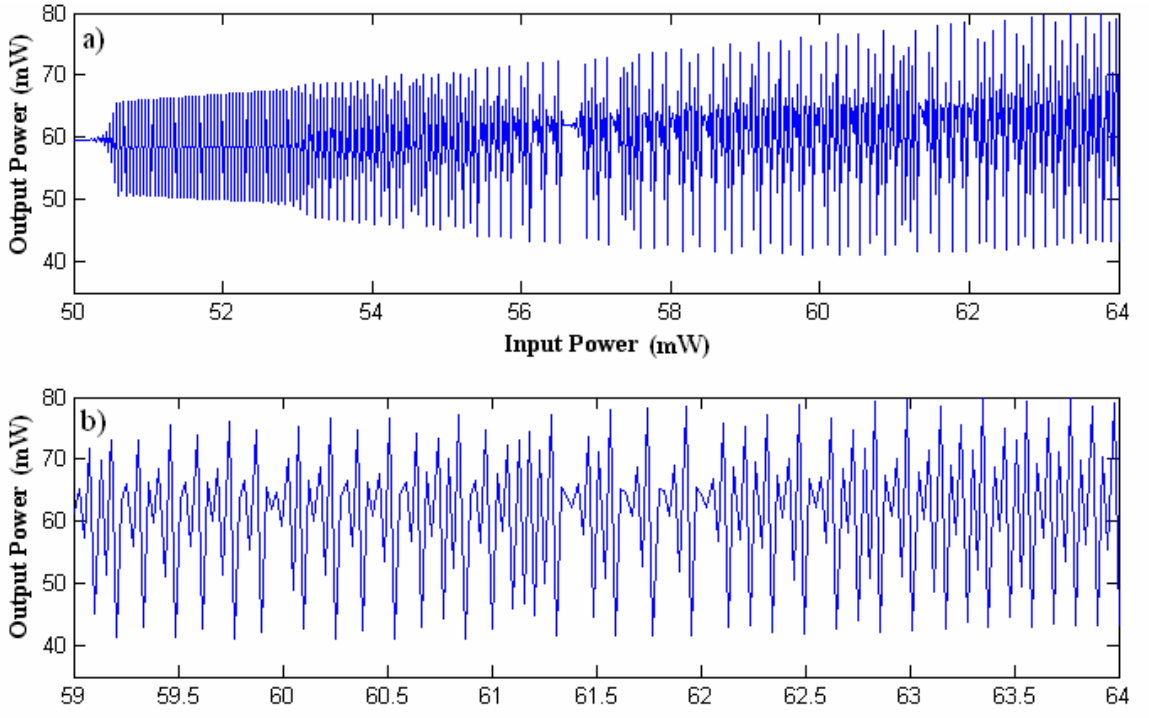
4.1.3 เคออสในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสง

ลักษณะการวนรอบวงแหวนใยแก้วนำแสงของพัลส์แสงที่ปั๊มเข้าไปโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใย-แก้วนำแสงจะทำให้เกิดการซ้อนทับกันของพัลส์เพิ่มมากขึ้นเมื่อการวนรอบภายในวงแหวนใยแก้วนำ-แสงเพิ่มจำนวนในการวนรอบมากขึ้นส่งผลให้ลักษณะเอาท์พุตของกำลังที่เป็นไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบกลายเป็นลักษณะของเคออสเกิดขึ้นเมื่อเพิ่มระดับกำลังแสงอินพุตเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ ซึ่งลักษณะเคออสที่เกิดขึ้นนี้เกิดจาก self-phase modulation ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องภายในวงแหวนใยแก้วนำแสงเหนี่ยวนำให้พัลส์แสงเกิดการซ้อนทับกันเพิ่มมากขึ้น ในรูปที่ 4.4a) และ 4.4b) ที่ระดับกำลังแสงอินพุต 45.3997– 103.5192 mW จะเห็นได้ว่าพัลส์แสงนั้นเกิดการซ้อนทับกันของการแทรกสอดของคลื่นแสงเพิ่มขึ้นแล้วลดลงที่ระดับกำลังแสงอินพุต 103.5192 mW เรียกพฤติกรรมการเกิดเคออสที่เกิดขึ้นตรงบริเวณนี้ว่า “อิเคดะอินสเตบิลิตี (Ikeda Instabilities)” หรือเป็นช่วงที่กำลังแสงเอาท์พุตไม่เสถียรนั่นเองซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ค้นพบโดยอิเคดะและคณะ [4,6] เมื่อค่ากำลังแสงอินพุตเพิ่มสูงมากพอประมาณ 53 mW การแทรกสอดที่เป็นการซ้อนทับกันของ

พัลส์แสงเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.4c) ซึ่งจะเห็นได้ว่าของการเกิดลักษณะเคออสนั้นค่ากำลังแสงอินพุตต้องสูงมากพอดังแสดงในรูปที่ 4.4c)



รูปที่ 4.4 คุณลักษณะเคออสที่เกิดขึ้นในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสง เมื่อ κ = 0.0225, ϕ_L = 0, และ n_2 = 3.2 x 10^{-20} m^2/W a) ไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบของกำลังแสงเอาท์พุตและอินพุต b) ไบฟูร์เคชันไดอะแกรมกำลังแสงเอาท์พุตและกำลังแสงอินพุตของการเพิ่มอินพุตแสง c) ขยายบริเวณแคบ ๆของรูป b) d) ขยายบริเวณแคบ ๆของรูป c)

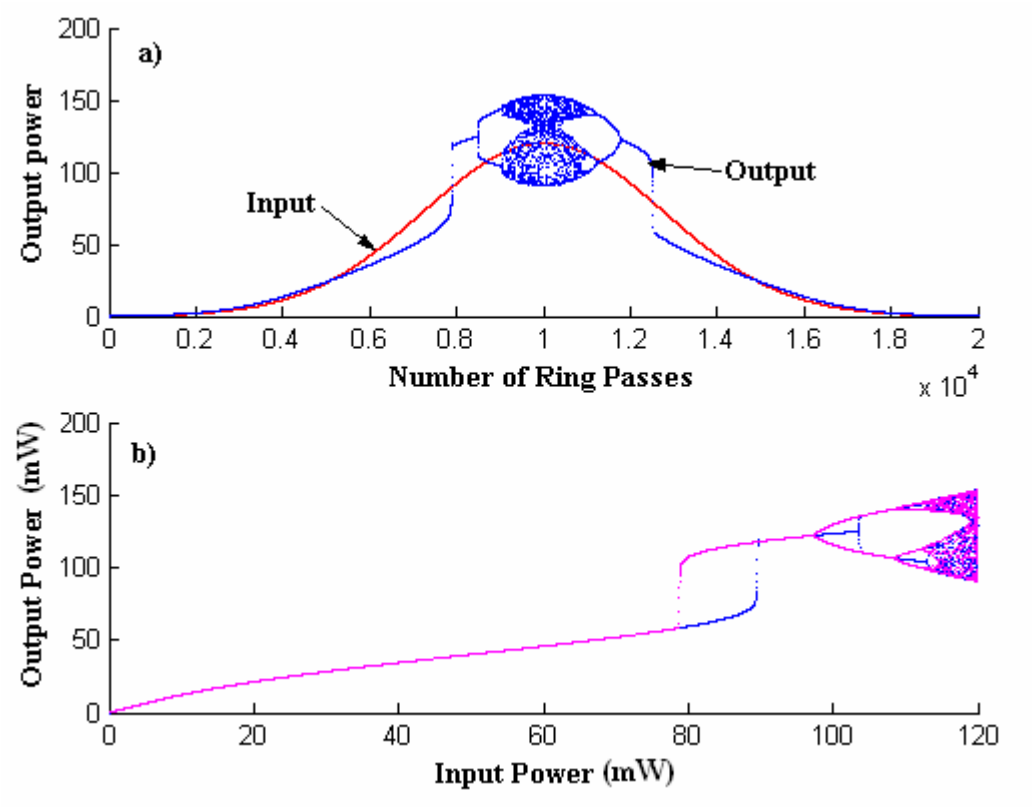


รูปที่ 4.5 คุณลักษณะของเคออสที่เกิดขึ้นในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนในแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว

ในรูปที่ 4.5a) และ 4.5b) แสดงคุณลักษณะเคออสที่เกิดขึ้นตลอดช่วงการวนรอบภายในวงแหวน-ใยแก้วนำแสงที่ระดับกำลังแสงอินพุต 50.2084 mW – 53.0000 mW ช่วงนี้เอาท์พุตกำลังแสงเป็นลักษณะแบบ 2 คาบ ส่วนลักษณะการเกิดเป็นเคออสนั้นจะเริ่มเกิดที่ระดับกำลังแสงอินพุต 53.0000 mW ซึ่งเป็นลักษณะของการออสซิลเลสของกำลังแสงภายในวงแหวนใยแก้วนำแสง เนื่องจาก $\chi^{(3)}$ ซึ่งเป็นการตอบสนองสำหรับปากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากการหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้นส่งผลให้ค่าดัชนีหักเหของใยแก้วนำแสงเปลี่ยนแปลงตามค่ากำลังแสง ($n_2|E|^2$) ที่เพิ่มขึ้นและการเปลี่ยนเฟสแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ขึ้นกำลังแสง $\phi_{NL} = n_2 k_0 L|E|^2$ ที่เกิดขึ้นเนื่องจาก self-phase modulation ตลอดช่วงการวนรอบภายในวงแหวนใยแก้วนำแสง

4.2 ผลของดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น

ในหัวข้อนี้เป็นการจำลองผลของดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้น (n_2) ของแกนใยแก้วนำแสงชนิด-โหมดเดี่ยวที่มีค่าอยู่ในช่วง 2.2 x 10^{-20} m^2/W – 3.4 x 10^{-20} m^2/W [8] ที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในโพรงสั่งพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว โดยกำหนดให้การเปลี่ยนเฟสแบบเชิงเส้นคงที่ (ϕ_L= 0) ความยาวของวงแหวนใยแก้ว 80 เมตร และอัตราส่วนการคัปปลิง-กำลังแสง (κ) เป็น 0.0225

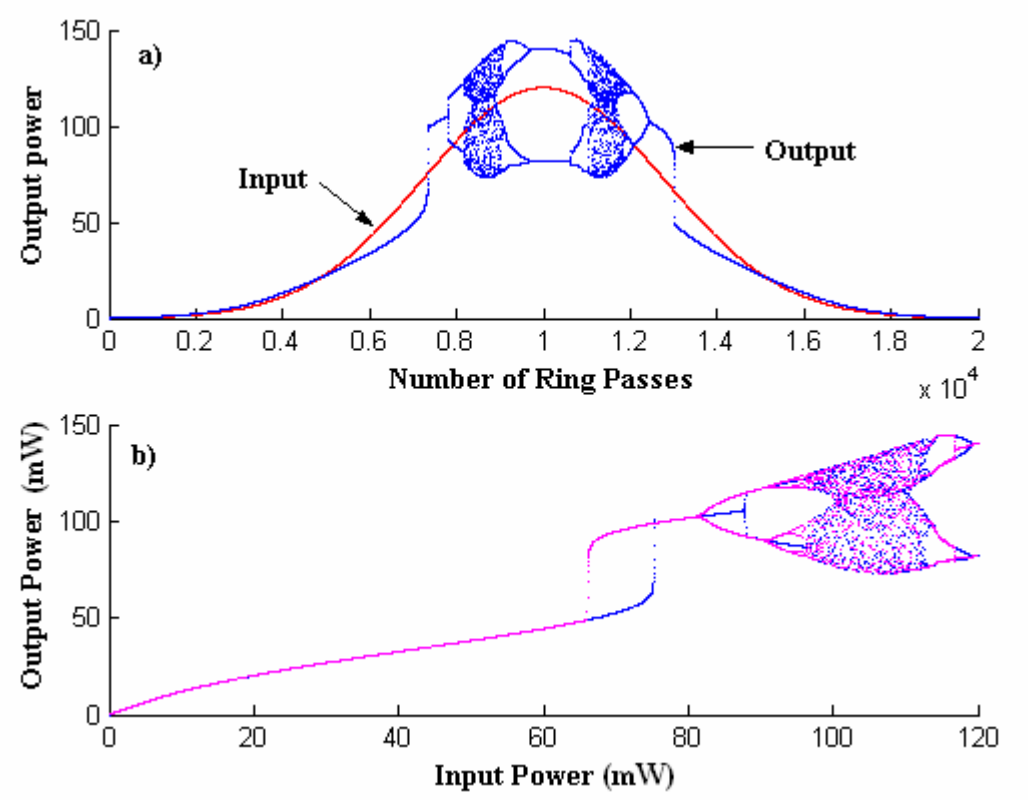


รูปที่ 4.6 ไบฟูร์เคชันไดอะแกรมของกำลังแสงเอาท์พุตในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงที่เปลี่ยนแปลงตามกำลังแสงอินพุต เมื่อ $n_2 = 2.2 \times 10^{-20}$ m^2/W **a)** กำลังแสงเอาท์พุตกับจำนวนลูปโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวน **b)** กำลังแสงเอาท์พุตกับกำลังแสงอินพุต

จากรูปที่ 4.6a) แสดงไบฟูร์เคชันไดอะแกรมเมื่อ $n_2 = 2.2 \times 10^{-20}$ m^2/W จะเห็นได้ว่าการวนลูปตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงการวนลูปรอบที่ 5,132 ค่าเอาท์พุตแสงจะแปรผันตรงกับค่าอินพุตแสง หลังจากนั้นค่าเอาท์พุตแสงจะลดต่ำค่าอินพุตแสงจนกระทั่งการวนลูปที่ 7,891 จะให้ค่าเอาท์พุตแสงเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดให้ค่าเอาท์พุต 2 ค่า (2 สภาวะ) การวนลูปที่ 8,488 เอาท์พุตแสงแยกออกเป็น 2 ค่าและที่การ วนลูปที่ 9,039 เอาท์พุตแสงแยกออกเป็น 2 ค่าอีกครั้งและแบ่งออกเป็น 2 ค่าอีกครั้งที่การวนลูปที่ 9,104และหลังจากนั้นการวนลูปที่ 1,192 ก็จะรวมค่าเอาท์พุตที่แยกออกในช่วงกาวนลูปที่ 9,104 และจะรวมกันอีกครั้งที่การวนลูปที่ 11,248 และ 11,816 จนเหลือค่าเอาท์พุตเพียงค่าเดียว การวนลูปที่ 12,534 ค่าเอาท์พุตลดลงต่ำกว่าค่าอินพุตแสงอย่างทันทีทันใดจนกระทั่งการวนลูปที่ 14,874 ค่าเอาท์พุตและอินพุตมีค่าเท่ากันตลอดจนครบการวนลูปที่ 20,000

ในรูปที่ 4.6b) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาท์พุตกำลังแสง ซึ่งจะเห็นได้ว่าระดับกำลังแสงอินพุตในการเกิดไบสเตบิลิตีเชิงแสงที่ 78.2292 – 90.1805 mW หลังนั้นเมื่อเพิ่มระดับกำลังแสงอินพุตขึ้นมาที่ 96.7471 mW ค่าเอาท์พุตกำลังแสงแบ่งออกเป็น 2 ระดับซึ่งเรียกว่าจุดไบฟูร์เค-ชันแบบ 2 คาบ และที่ระดับกำลังแสงอินพุตที่ 108.3202 mW ค่าเอาท์พุตกำลังแสง

แบ่งออกเป็น 2 ระดับอีกครั้งหนึ่งซึ่งจะได้จุดไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบเป็นจุดใหม่และที่ระดับกำลังแสงอินพุต 112.0962 mW ค่าเอาท์พุตกำลังแสงแบ่งออกเป็น 2 ระดับอีกครั้งซึ่งจะได้จุดไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบเป็นจุดใหม่ หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มระดับกำลังแสงอินพุตเพิ่มอีกค่าเอาท์พุตจะกลายเป็นระบบเคออสเชิงแสงต่อไป

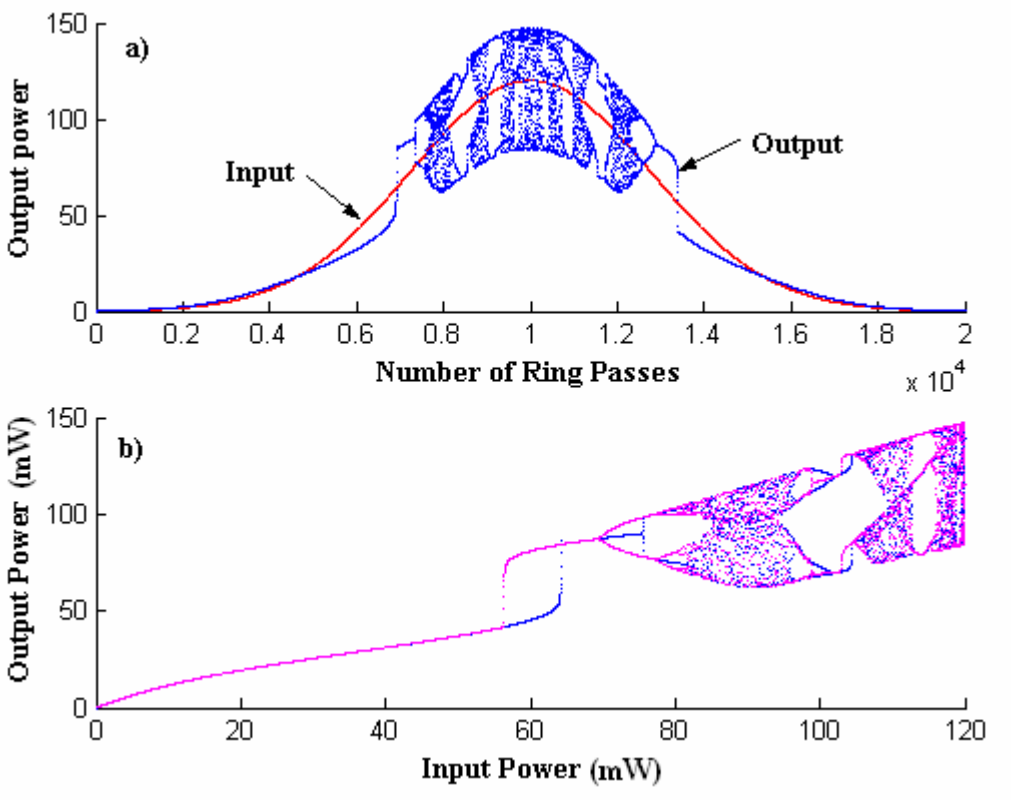


รูปที่ 4.7 ไบฟูร์เคชันไดอะแกรมของกำลังแสงเอาท์พุตในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงที่เปลี่ยนแปลงตามกำลังแสงอินพุต เมื่อ $n_2 = 2.4 \times 10^{-20}$ m^2/W **a)** กำลังแสงเอาท์พุตกับจำนวนลูปโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวน **b)** กำลังแสงเอาท์พุตกับกำลังแสงอินพุต

จากรูปที่ 4.7a) แสดงไบฟูร์เคชันไดอะแกรมเมื่อ $n_2 = 2.4 \times 10^{-20}$ m^2/W จะเห็นได้ว่าการวนลูปตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงการวนลูปรอบที่ 4,859 ค่าเอาท์พุตแสงจะแปรผันตรงกับค่าอินพุตแสง หลังจากนั้นค่าเอาท์พุตแสงจะลดต่ำค่าอินพุตแสงจนกระทั่งการวนลูปที่ 7,340 จะให้ค่าเอาท์พุตแสงเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดให้ค่าเอาท์พุต 2 ค่า (2 สภาวะ) การวนลูปที่ 7,804 เอาท์พุตแสงแยกออกเป็น 2 ค่าและที่การ วนลูปที่ 8,162 เอาท์พุตแสงแยกออกเป็น 2 ค่าอีกครั้งและที่การวนลูปที่ 9,719 เป็นการรวมค่าเอาท์พุตที่แยกออกช่วงการวนลูปที่ 8,162 และการวนลูปที่ 10,619 ค่าเอาท์พุตแบ่งออกเป็น 2 ค่าอีกครั้งและ การวนลูปที่ 12,065 เป็นการรวมค่าเอาท์พุตที่แยกออกช่วงการวนลูปที่ 10,619 และหลังจากนั้นการวนลูปที่ 12,449 ก็จะรวมค่าเอาท์พุตเป็นค่าเดียว

การวนลูปที่ 13,013 ค่าเอาท์พุตลดลงต่ำกว่าค่าอินพุตแสงอย่างทันทีทันใด จนกระทั่งการวนลูปที่ 15,133 ค่าเอาท์พุตและอินพุตมีค่าเท่ากันตลอดจนครบการวนลูปที่ 20,000

ในรูปที่ 4.7b) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาท์พุตกำลังแสง ซึ่งจะเห็นได้ว่าระดับกำลังแสงอินพุตในการเกิดไบสเตบิลิตีเชิงแสงที่ 66.0386 – 75.5461 mW หลังนั้นเมื่อเพิ่มระดับกำลังแสงอินพุตขึ้นมาที่ 81.1050 mW ค่าเอาท์พุตกำลังแสงแบ่งออกเป็น 2 ระดับซึ่งเรียกว่าจุดไบฟูร์เค-ชันแบบ 2 คาบ และที่ระดับกำลังแสงอินพุตที่ 90.7355 mW ค่าเอาท์พุตกำลังแสงแบ่งออกเป็น 2 ระดับอีกครั้งหนึ่งซึ่งจะได้จุดไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบเป็นจุดใหม่และที่ระดับกำลังแสงอินพุต 96.1460 mW ค่าเอาท์พุตกำลังแสงแบ่งออกเป็น 2 ระดับอีกครั้งซึ่งจะได้จุดไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบเป็นจุดใหม่ หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มระดับกำลังแสงอินพุตเพิ่มอีกค่าเอาท์พุตจะกลายเป็นระบบเคออสเชิงแสงเนื่องจากเกิดการแทรกสอดของระดับกำลังอินพุตเพิ่มมากขึ้นและที่ระดับอินพุต 113.2833 mW การแทรกสอดจะลดน้อยลงและที่ระดับกำลังแสงอินพุต 119.2920 mW เกิดอิ่มตัว (saturation) ของการเกิดการแทรกสอดกำลังแสงอินพุต



รูปที่ 4.8 ไบฟูร์เคชันไดอะแกรมของกำลังแสงเอาท์พุตในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงที่เปลี่ยนแปลงตามกำลังแสงอินพุต เมื่อ $n_2 = 2.6 \times 10^{-20}$ m^2/W **a)** กำลังแสงเอาท์พุตกับจำนวนลูปโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวน **b)** กำลังแสงเอาท์พุตกับกำลังแสงอินพุต

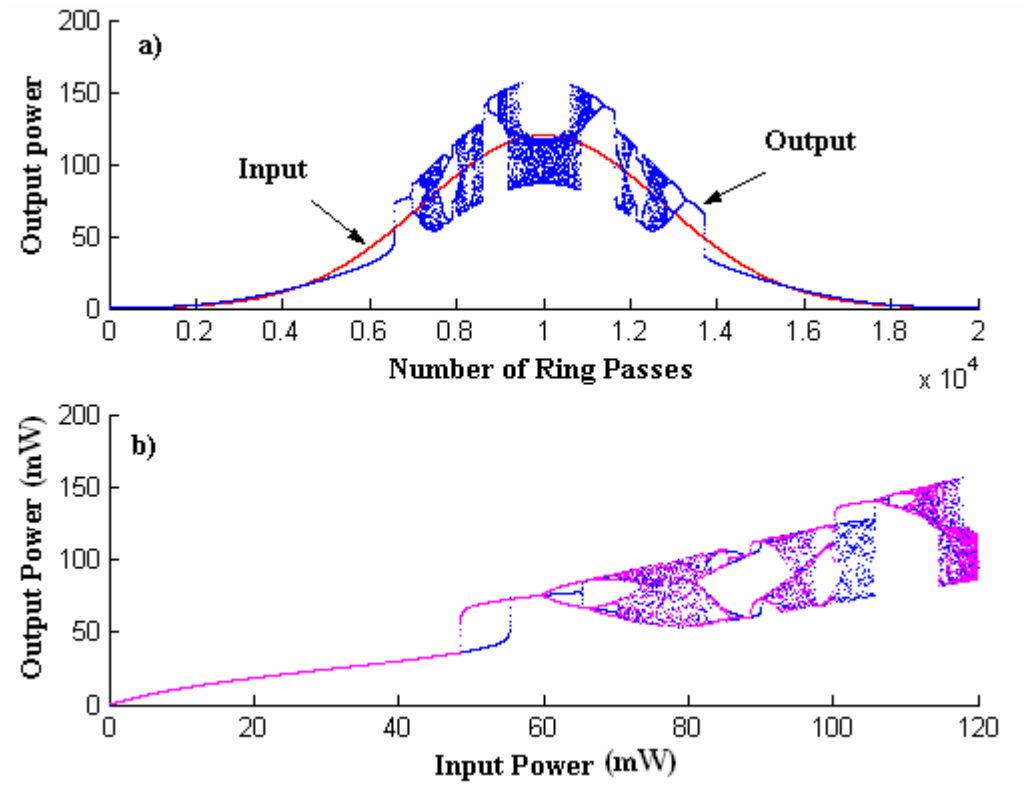
จากรูปที่ 4.8a) แสดงไบฟูร์เคชันไดอะแกรมเมื่อ n_2 = 2.6 x 10^{-20} m^2/W จะเห็นได้ว่าการวนลูปตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงการวนลูปรอบที่ 4,629 ค่าเอาท์พุตแสงจะแปรผันตรงกับค่าอินพุตแสง หลังจากนั้นค่าเอาท์พุตแสงจะลดต่ำค่าอินพุตแสงจนกระทั่งการวนลูปที่ 6,918 จะให้ค่าเอาท์พุตแสงเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดให้ค่าเอาท์พุต 2 ค่า (2 สภาวะ) การวนลูปที่ 7,336 เอาท์พุตแสงแยกออกเป็น 2 ค่าและที่การ วนลูปที่ 7,581 เอาท์พุตแสงแยกออกเป็น 2 ค่าอีกครั้งและที่การวนลูปที่ 8,428 เป็นการรวมค่าเอาท์พุตที่แยกออกช่วงการวนลูปที่ 7,581 และการวนลูปที่ 8,546 ค่าเอาท์พุตจะเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดอีกครั้ง การวนลูปที่ 8,617 ค่าเอาท์พุตกำลังแสงแบ่งออกเป็น 2 ค่าอีกครั้งและการวนลูปที่ 9,027 เป็นการรวมค่าเอาท์พุตที่แยกออกช่วงการวนลูปที่ 8,617 และการวนลูปที่ 9,319 ค่าเอาท์พุตกำลังแสงแบ่งออกเป็น 2 ค่าอีกครั้งและการวนลูปที่ 11,448 เป็นการรวมค่าเอาท์พุตที่แยกออก การวนลูปที่ 11,530 ค่าเอาท์พุตลดลงอย่างทันทีทันใดอีกครั้งหนึ่ง หลังจากนั้นการวนลูปที่ 11,700 ค่าเอาท์พุตแบ่งออกเป็น 2 ระดับอีกครั้งจนกระทั่งรวมกันในช่วงของการวนลูปที่ 12,587 และการวนลูปที่ 12,908 ก็จะรวมค่าเอาท์พุตเป็นค่าเดียว (ซึ่งแยกเป็นเป็น 2 ค่าในช่วงการวนลูปที่ 7,336) การวนลูปที่ 13,394 ค่าเอาท์พุตลดลงต่ำกว่าค่าอินพุตแสงอย่างทันทีทันใด จนกระทั่งการวนลูปที่ 15,364 ค่าเอาท์พุตและอินพุตมีค่าเท่ากันตลอดจนครบการวนลูปที่ 20,000

ในรูปที่ 4.8b) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาท์พุตกำลังแสง ซึ่งจะเห็นได้ว่าระดับกำลังแสงอินพุตในการเกิดไบสเตบิลิตีเชิงแสงที่ระดับ 56.1938 – 64.3674 mW หลังนั้นเมื่อเพิ่มระดับกำลังแสงอินพุตขึ้นมาที่ 69.1107 mW ค่าเอาท์พุตกำลังแสงแบ่งออกเป็น 2 ระดับซึ่งเรียกว่า จุด-ไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบ และที่ระดับกำลังแสงอินพุตที่ 77.1257 mW ค่าเอาท์พุตกำลังแสงแบ่งออกเป็น 2 ระดับอีกครั้งหนึ่งซึ่งจะได้จุดไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบเป็นจุดใหม่และที่ระดับกำลังแสงอินพุต 80.0096 mW ค่าเอาท์พุตกำลังแสงแบ่งออกเป็น 2 ระดับอีกครั้งซึ่งจะได้จุดไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบเป็นจุดใหม่ หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มระดับกำลังแสงอินพุตเพิ่มอีกค่าเอาท์พุตจะกลายเป็นระบบเคออสเชิงแสงเนื่องจากเกิดการแทรกสอดของระดับกำลังอินพุตเพิ่มมากขึ้นและที่ระดับอินพุต 96.6319 mW การแทรกสอดจะลดน้อยลงและที่ระดับกำลังแสงอินพุต 102.0260 mW เกิดอิ่มตัว (saturation) ของการเกิดการแทรกสอดกำลังแสงอินพุต เกิดไบสเตบิลิตีเชิงแสงอีกครั้งเมื่อเพิ่มระดับกำลังแสงอินพุต 102.8410 – 104.5077 mW และเกิดไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบ อีกครั้งที่ระดับกำลังแสงอินพุต 104.5077 mW และ 115.1398 mW ตามลำดับและค่าเอาท์พุตกลายเป็นเคออสเชิงแสงเมื่อเพิ่มระดับกำลังแสงอินพุตขึ้นต่อไป

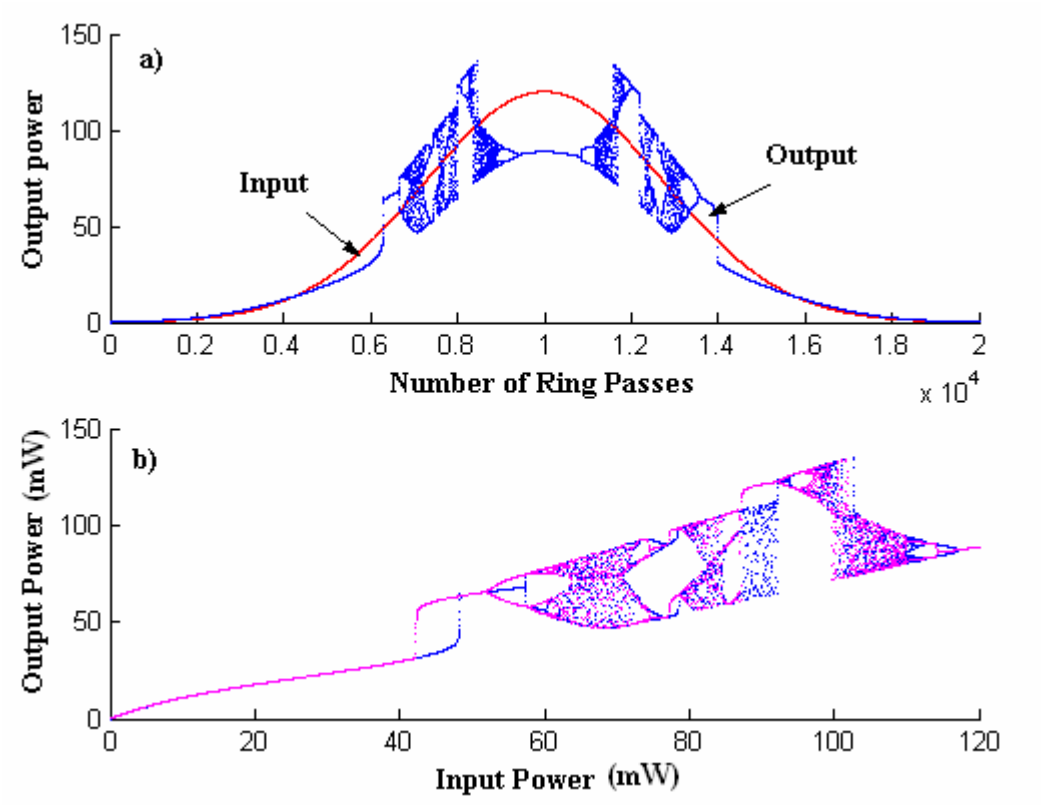
จากรูปที่ 4.9a) แสดงไบฟูร์เคชันไดอะแกรมเมื่อ n_2 = 2.8 x 10^{-20} m^2/W จะเห็นได้ว่าการวนลูปตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงการวนลูปรอบที่ 4,423 ค่าเอาท์พุตแสงจะแปรผันตรงกับค่าอินพุตแสง หลังจากนั้นค่าเอาท์พุตแสงจะลดต่ำค่าอินพุตแสงจนกระทั่งการวนลูปที่ 6,561 จะให้ค่าเอาท์พุตแสงเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดให้ค่าเอาท์พุต 2 ค่า (2 สภาวะ) การวนลูปที่ 6,947 เอาท์พุตแสงแยก

ออกเป็น 2 ค่าและที่การ วนลูปที่ 7,140 เอาท์พุตแสงแยกออกเป็น 2 ค่าอีกครั้งและที่การวนลูปที่ 7,834 เป็นการรวมค่าเอาท์พุตที่แยกออกช่วงการวนลูปที่ 7,140 และการวนลูปที่ 7,913 ค่าเอาท์พุตจะเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดอีกครั้ง การวนลูปที่ 7,965 ค่าเอาท์พุตกำลังแสงแบ่งออกเป็น 2 ค่าอีกครั้งและการวนลูปที่ 8,680 จะเกิดไบฟูร์-เคชันแบบ 2 คาบอีกครั้งหนึ่งจนกระทั่งการวนลูปที่ 11,375 การวนลูปที่ 11,652 และ 12,087 ค่าเอาท์พุตลดลงอย่างทันทีทันใดอีกครั้งหนึ่ง หลังจากนั้นการวนลูปที่ 12,143 ค่าเอาท์พุตแบ่งออกเป็น 2 ระดับอีกครั้งจนกระทั่งรวมกันในช่วงของการวนลูปที่ 12,988 และการวนลูปที่ 13,271 ก็จะรวมค่าเอาท์พุตเป็นค่าเดียว (ซึ่งแยกเป็นเป็น 2 ค่าในช่วงการวนลูปที่ 6,947) การวนลูปที่ 13,705 ค่าเอาท์พุตลดลงต่ำกว่าค่าอินพุตแสงอย่างทันทีทันใด จนกระทั่งการวนลูปที่ 15,575 ค่าเอาท์พุตและอินพุตมีค่าเท่ากันตลอดจนครบการวนลูปที่ 20,000

ในรูปที่ 4.9b) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาท์พุตกำลังแสง ซึ่งจะเห็นได้ว่าระดับกำลังแสงอินพุตในการเกิดไบสเตบิลิตีเชิงแสงที่ระดับ 48.4060 – 55.6175 mW หลังนั้นเมื่อเพิ่มระดับกำลังแสงอินพุตขึ้นมาที่ 59.7174 mW ค่าเอาท์พุตกำลังแสงแบ่งออกเป็น 2 ระดับซึ่งเรียกว่า จุด-ไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบ และที่ระดับกำลังแสงอินพุตที่ 66.721 mW ค่าเอาท์พุตกำลังแสงแบ่งออกเป็น 2 ระดับอีกครั้งหนึ่งซึ่งจะได้จุดไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบเป็นจุดใหม่และที่ระดับกำลังแสงอินพุต 69.5057 mW ค่าเอาท์พุตกำลังแสงแบ่งออกเป็น 2 ระดับอีกครั้งซึ่งจะได้จุดไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบเป็นจุดใหม่ หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มระดับกำลังแสงอินพุตเพิ่มอีกค่าเอาท์พุตจะกลายเป็นระบบเคออสเชิงแสงเนื่องจากเกิดการแทรกสอดของระดับกำลังอินพุตเพิ่มมากขึ้นและที่ระดับอินพุต 83.3086 mW การแทรกสอดจะลดน้อยลงและที่ระดับกำลังแสงอินพุต 87.7729 mW เกิดอิ่มตัว (saturation) ของการเกิดการแทรกสอดกำลังแสงอินพุต เกิดไบสเตบิลิตีเชิงแสงอีกครั้งเมื่อเพิ่มระดับกำลังแสงอินพุต 88.5761 – 90.2177 mW และเกิดไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบ อีกครั้งที่ระดับกำลังแสงอินพุต 90.2177 mW และค่าเอาท์พุตกลายเป็นเคออสเชิงแสงเมื่อเพิ่มระดับกำลังแสงอินพุตขึ้นต่อไปและเกิดไบสเตบิลิตีเชิงแสงอีกครั้งที่ระดับกำลังแสงอินพุต 100.2680 – 105.8777 mW และกลายเป็นไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบอีกครั้งที่ระดับอินพุต 105.8777 และ 109.3490 mW ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 ไบฟูร์เคชันไดอะแกรมของกำลังแสงเอาท์พุตในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงที่เปลี่ยนแปลงตามกำลังแสงอินพุต เมื่อ $n_2 = 2.8 \times 10^{-20}$ m^2/W a) กำลังแสงเอาท์พุตกับจำนวนลูปโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวน b) กำลังแสงเอาท์พุตกับกำลังแสงอินพุต



รูปที่ 4.10 ไบฟูร์เคชันไดอะแกรมของกำลังแสงเอาท์พุตในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงที่เปลี่ยนแปลงตามกำลังแสงอินพุต เมื่อ $n_2 = 3.0 \times 10^{-20}$ m^2/W a) กำลังแสงเอาท์พุตกับจำนวนลูปโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวน b) กำลังแสงเอาท์พุตกับกำลังแสงอินพุต

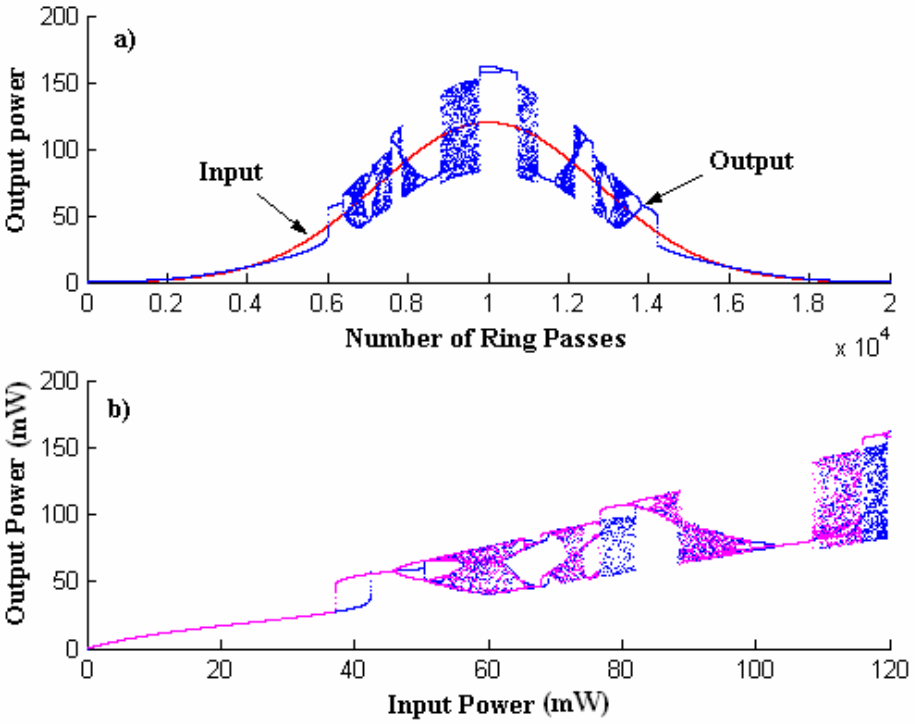
จากรูปที่ 4.10a) แสดงไบฟูร์เคชันไดอะแกรมเมื่อ $n_2 = 3.0 \times 10^{-20}$ m^2/W จะเห็นได้ว่าการวนลูปตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงการวนลูปรอบที่ 4,236 ค่าเอาท์พุตแสงจะแปรผันตรงกับค่าอินพุตแสง หลังจากนั้นค่าเอาท์พุตแสงจะลดต่ำค่าอินพุตแสงจนกระทั่งการวนลูปที่ 6,275 จะให้ค่าเอาท์พุตแสงเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดให้ค่าเอาท์พุต 2 ค่า (2 สภาวะ) การวนลูปที่ 6,637 เอาท์พุตแสงแยกออกเป็น 2 ค่าและที่การ วนลูปที่ 6,756 เอาท์พุตแสงแยกออกเป็น 2 ค่าอีกครั้งและที่การวนลูปที่ 7,391 เป็นการรวมค่าเอาท์พุตที่แยกออกช่วงการวนลูปที่ 6,756 และการวนลูปที่ 7,483 ค่าเอาท์พุตจะเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดอีกครั้ง การวนลูปที่ 7,493 และ 8,033 ค่าเอาท์พุตกำลังแสงแบ่งออกเป็น 2 ค่าอีกครั้งและรวมกันในการวนลูปที่ 9,427 จนกระทั่งการวนลูปที่ 10,855 ค่าเอาท์พุตกำลังแสงแบ่งออกเป็น 2 ค่าอีกครั้งและสิ้นสุดที่การวนลูปที่ 11,873 การวนลูปที่ 12,004 และ 12,541 ค่าเอาท์พุตลดลงอย่างทันทีทันใดอีกครั้งหนึ่ง หลังจากนั้นการวนลูปที่ 12,683 ค่าเอาท์พุตแบ่งออกเป็น 2 ระดับอีกครั้งจนกระทั่งรวมกันในช่วงของการวนลูปที่ 13,325 และการวนลูปที่ 13,585 ก็จะรวมค่าเอาท์พุตเป็นค่าเดียว (ซึ่งแยกเป็นเป็น 2 ค่าในช่วงการวนลูปที่ 6,637) การวน

ลูปที่ 13,984 ค่าเอาท์พุตลดลงต่ำกว่าค่าอินพุตแสงอย่างทันทีทันใด จนกระทั่งการวนลูปที่ 15,761 ค่าเอาท์พุตและอินพุตมีค่าเท่ากันตลอดจนครบการวนลูปที่ 20,000

ในรูปที่ 4.10b) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาท์พุตกำลังแสง ซึ่งจะเห็นได้ว่าระดับกำลังแสงอินพุตในการเกิดไบสเตบิลิตีเชิงแสงที่ระดับ 42.1540 – 48.5007 mW หลังนั้นเมื่อเพิ่มระดับกำลังแสงอินพุตขึ้นมาที่ 51.8639 mW ค่าเอาท์พุตกำลังแสงแบ่งออกเป็น 2 ระดับซึ่งเรียกว่าจุดไบ-ฟูร์เคชันแบบ 2 คาบ และที่ระดับกำลังแสงอินพุตที่ 58.0106 mW ค่าเอาท์พุตกำลังแสงแบ่งออกเป็น 2 ระดับอีกครั้งหนึ่งซึ่งจะได้จุดไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบเป็นจุดใหม่และที่ระดับกำลังแสงอินพุต 60.2041 mW ค่าเอาท์พุตกำลังแสงแบ่งออกเป็น 2 ระดับอีกครั้งซึ่งจะได้จุดไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบเป็นจุดใหม่ หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มระดับกำลังแสงอินพุตเพิ่มอีกค่าเอาท์พุตจะกลายเป็นระบบเคออสเชิงแสงเนื่องจากเกิดการแทรกสอดของระดับกำลังอินพุตเพิ่มมากขึ้นและที่ระดับอินพุต 72.3275 mW การแทรกสอดจะลดน้อยลงและที่ระดับกำลังแสงอินพุต 76.6522 mW เกิดอิ่มตัว (saturation) ของการเกิดการแทรกสอดกำลังแสงอินพุต เกิดไบสเตบิลิตีเชิงแสงอีกครั้งเมื่อเพิ่มระดับกำลังแสงอินพุต 77.0732 – 78.5963 mW และเกิดไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบ อีกครั้งที่ระดับกำลังแสงอินพุต 78.5963 mW และค่าเอาท์พุตกลายเป็นเคออสเชิงแสงเมื่อเพิ่มระดับกำลังแสงอินพุตขึ้นต่อไปและอิ่มตัวที่ระดับ 83.2561 mW เกิดไบสเตบิลิตีเชิงแสงอีกครั้งที่ระดับกำลังแสงอินพุต 87.2938 – 92.2747 mW และกลายเป็นไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบอีกครั้งที่ระดับอินพุต 92.2747 และ 95.2824 mW ตามลำดับและอิ่มตัวที่ระดับ 117.4108 mW

จากรูปที่ 4.11a) แสดงไบฟูร์เคชันไดอะแกรมเมื่อ $n_2 = 3.2 \times 10^{-20}$ m^2/W จะเห็นได้ว่าการวนลูปตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงการวนลูปรอบที่ 4,068 ค่าเอาท์พุตแสงจะแปรผันตรงกับค่าอินพุตแสง หลังจากนั้นค่าเอาท์พุตแสงจะลดต่ำค่าอินพุตแสงจนกระทั่งการวนลูปที่ 6,022 จะให้ค่าเอาท์พุตแสงเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดให้ค่าเอาท์พุต 2 ค่า (2 สภาวะ) การวนลูปที่ 6,359 เอาท์พุตแสงแยกออกเป็น 2 ค่าและที่ การวนลูปที่ 6,465 เอาท์พุตแสงแยกออกเป็น 2 ค่าอีกครั้งและที่การวนลูปที่ 6,903 เป็นการรวมค่าเอาท์พุตที่แยกออกช่วงการวนลูปที่ 6,465 และการวนลูปที่ 7,045 ค่าเอาท์พุตจะเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดอีกครั้ง การวนลูปที่ 7,104 และ 7,594 ค่าเอาท์พุตกำลังแสงแบ่งออกเป็น 2 ค่าอีกครั้งและรวมกันใน การวนลูปที่ 8,496 จนกระทั่งการวนลูปที่ 8,813 ค่าเอาท์พุตกำลังแสงเกิดการแทรกสอดเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งการวนลูปที่ 9,978 และแบ่งค่าออกเป็น 2 สภาวะจนสิ้นสุดที่การวนลูปที่ 10,377 และเกิดการแทรกสอดเพิ่มขึ้นจนถึงการวนลูปที่ 11,245 การวนลูปที่ 11,693 เอาท์พุตแสงแบ่งออกเป็น 2 ค่าอีกครั้งและสิ้นสุดที่การวนลูปที่ 12,345 การวนลูปที่ 12,452 และ 12,901 ค่าเอาท์พุตลดลงอย่างทันทีทันใดอีกครั้งหนึ่ง หลังจากนั้นการวนลูปที่ 13,027 ค่าเอาท์พุตแบ่งออกเป็น 2 ระดับอีกครั้งจนกระทั่งรวมกันในช่วงของการวนลูปที่ 13,612 และการวนลูปที่ 13,846 ก็จะรวมค่าเอาท์พุตเป็นค่าเดียว (ซึ่งแยกเป็นเป็น 2 ค่าในช่วงการวนลูปที่ 6,359) การวนลูปที่ 14,224 ค่าเอาท์พุตลดลงต่ำกว่าค่าอินพุตแสงอย่างทันทีทันใด จนกระทั่งการวนลูปที่ 15,928 ค่าเอาท์พุตและอินพุตมีค่าเท่ากันตลอดจนครบการวนลูปที่ 20,000

ในรูปที่ 4.11b) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาท์พุตกำลังแสง ซึ่งจะเห็นได้ว่าระดับกำลังแสงอินพุตในการเกิดไบสเตบิลิตีเชิงแสงที่ระดับ 37.0480 – 42.6642 mW หลังนั้นเมื่อเพิ่มระดับกำลังแสงอินพุตขึ้นมาที่ 45.4912 mW ค่าเอาท์พุตกำลังแสงแบ่งออกเป็น 2 ระดับซึ่งเรียกว่า จุด-ไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบ และที่ระดับกำลังแสงอินพุตที่ 50.8933 mW ค่าเอาท์พุตกำลังแสงแบ่งออกเป็น 2 ระดับอีกครั้งหนึ่งซึ่งจะได้จุดไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบเป็นจุดใหม่และที่ระดับกำลังแสงอินพุต 52.9402 mW ค่าเอาท์พุตกำลังแสงแบ่งออกเป็น 2 ระดับอีกครั้งซึ่งจะได้จุดไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบเป็นจุดใหม่ หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มระดับกำลังแสงอินพุตเพิ่มอีกค่าเอาท์พุตจะกลายเป็นระบบเคออสเชิงแสงเนื่องจากเกิดการแทรกสอดของระดับกำลังอินพุตเพิ่มมากขึ้นและที่ระดับอินพุต 64.4195 mW การแทรกสอดจะลดน้อยลงและที่ระดับกำลังแสงอินพุต 67.2443 mW เกิดอิ่มตัว (saturation) ของการเกิดการแทรกสอดกำลังแสงอินพุต เกิดไบสเตบิลิตีเชิงแสงอีกครั้งเมื่อเพิ่มระดับกำลังแสงอินพุต 67.7431 – 69.1897 mW และเกิดไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบ อีกครั้งที่ระดับกำลังแสงอินพุต 69.1897 mW และค่าเอาท์พุตกลายเป็นเคออสเชิงแสงเมื่อเพิ่มระดับกำลังแสงอินพุตขึ้นต่อไปและอิ่มตัวที่ระดับ 74.8079 mW เกิดไบสเตบิลิตีเชิงแสงอีกครั้งที่ระดับกำลังแสงอินพุต 76.6785 – 82.0666 mW และกลายเป็นไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบอีกครั้งที่ระดับอินพุต 80.9748 และ 83.5665 mW ตามลำดับและอิ่มตัวที่ระดับ 103.4991 mW เมื่อเพิ่มระดับกำลังแสงอินพุตเป็น 108.3557 mW จะกลายเป็นเคออสเชิงแสงอีกครั้ง



รูปที่ 4.11 ไบฟูร์เคชันไดอะแกรมของกำลังแสงเอาท์พุตในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงที่เปลี่ยนแปลงตามกำลังแสงอินพุต เมื่อ $n_2 = 3.2 \times 10^{-20}$ m^2/W

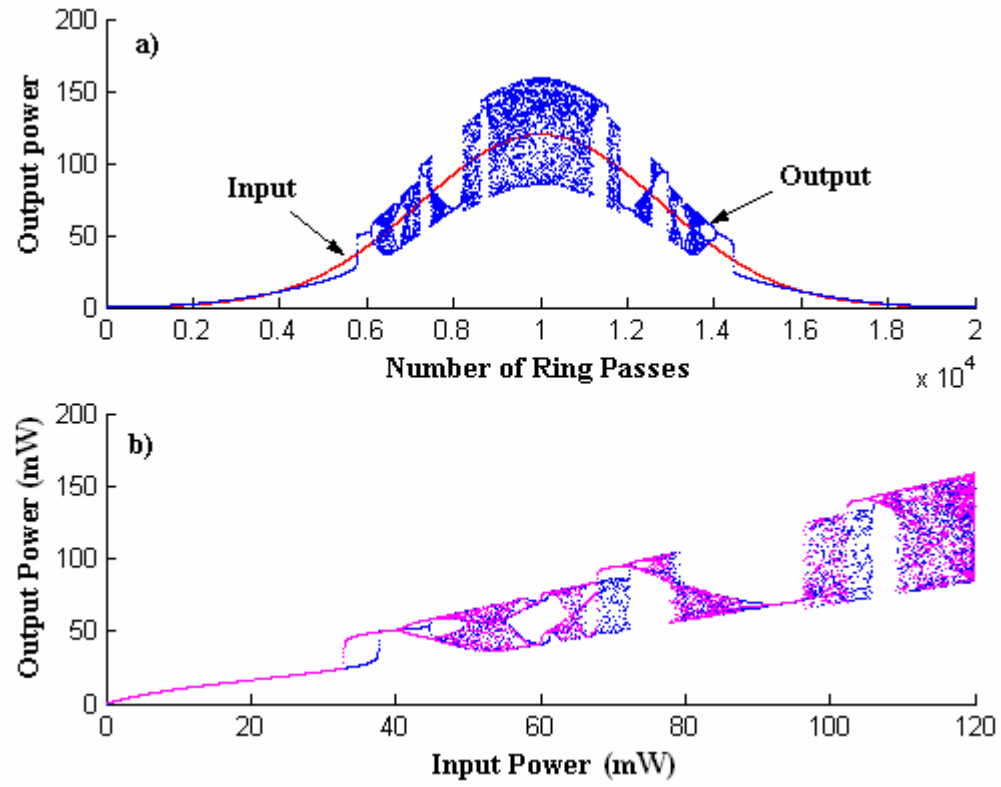
a) กำลังแสงเอาท์พุตกับจำนวนลูปโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวน

b) กำลังแสงเอาท์พุตกับกำลังแสงอินพุต

จากรูปที่ 4.12a) แสดงไบฟูร์เคชันไดอะแกรมเมื่อ $n_2 = 3.4 \times 10^{-20}$ m^2/W จะเห็นได้ว่าการวนลูปตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงการวนลูปรอบที่ 3,915 ค่าเอาท์พุตแสงจะแปรผันตรงกับค่าอินพุตแสง หลังจากนั้นค่าเอาท์พุตแสงจะลดต่ำค่าอินพุตแสงจนกระทั่งการวนลูปที่ 5,799 จะให้ค่าเอาท์พุตแสงเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดให้ค่าเอาท์พุต 2 ค่า (2 สภาวะ) การวนลูปที่ 6,115 เอาท์พุตแสงแยกออกเป็น 2 ค่าและที่ การวนลูปที่ 6,209 เอาท์พุตแสงแยกออกเป็น 2 ค่าอีกครั้งและที่การวนลูปที่ 6,743 เป็นการรวมค่าเอาท์พุตที่แยกออกช่วงการวนลูปที่ 6,209 และการวนลูปที่ 6,803 ค่าเอาท์พุตจะเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดอีกครั้ง การวนลูปที่ 6,845 และ 7,225 ค่าเอาท์พุตกำลังแสงแบ่งออกเป็น 2 ค่าอีกครั้งและรวมกันใน การวนลูปที่ 7,978 จนกระทั่งการวนลูปที่ 8,198 ค่าเอาท์พุตกำลังแสงเกิดการแทรกสอดเพิ่มมากขึ้นและอิ่มตัวในการวนลูปที่ 8,549 และการวนลูปที่ 8,626 ค่าเอาท์พุตแบ่งค่าออกเป็น 2 สภาวะและเพิ่มการแทรกสอดมากขึ้นจนสิ้นสุดที่การวนลูปที่ 11,420 และเกิดการแทรกสอดเพิ่มขึ้นจนถึงการวนลูปที่ 11,831 การวนลูปที่ 12,178 เอาท์พุตแสงแบ่งออกเป็น 2 ค่าอีกครั้งและสิ้นสุดที่การวนลูปที่ 12,803 การวนลูปที่ 12,944 และ 13,210 ค่าเอาท์พุตลดลงอย่างทันทีทันใดอีกครั้งหนึ่ง หลังจากนั้นการวนลูปที่ 13,314 ค่าเอาท์พุตแบ่งออกเป็น 2 ระดับอีกครั้งจนกระทั่งรวมกันในช่วงของการวนลูปที่ 13,856 และการวนลูปที่ 14,080 ก็จะรวมค่าเอาท์พุตเป็นค่าเดียว (ซึ่งแยกเป็นเป็น 2 ค่าในช่วงการวนลูปที่ 6,115) การวนลูปที่ 14,438 ค่าเอาท์พุตลดลงต่ำกว่าค่าอินพุตแสงอย่างทันทีทันใด จนกระทั่งการวนลูปที่ 16,077 ค่าเอาท์พุตและอินพุตมีค่าเท่ากันตลอดจนครบการวนลูปที่ 20,000

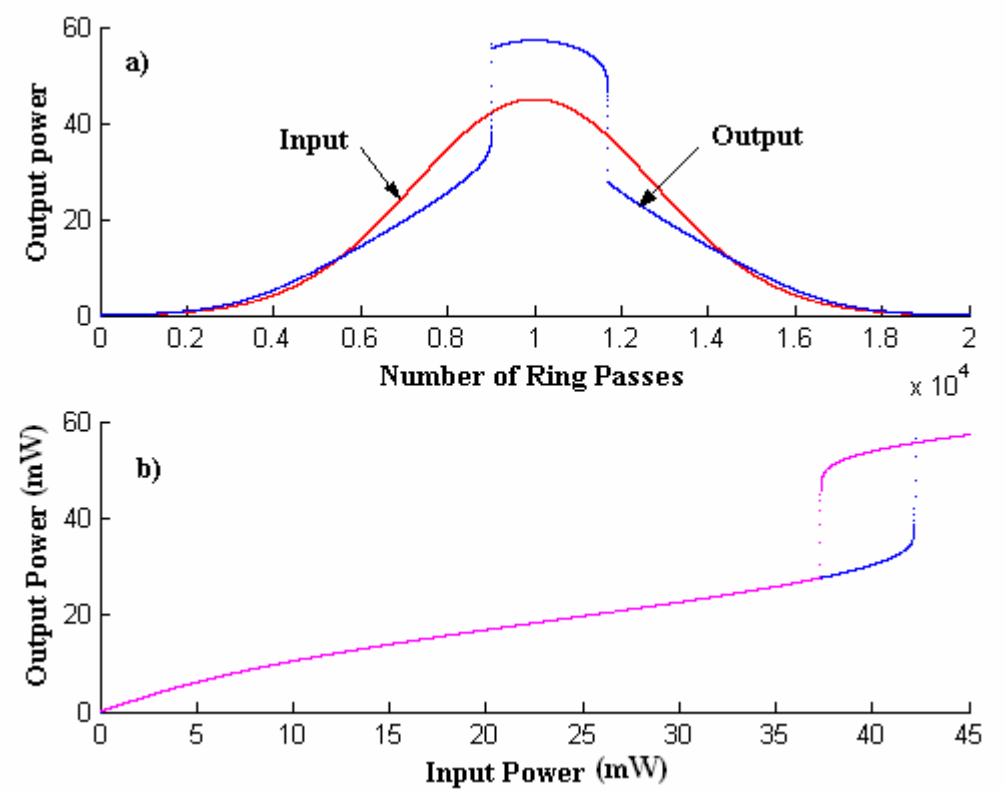
ในรูปที่ 4.12b) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาท์พุตกำลังแสง ซึ่งจะเห็นได้ว่าระดับกำลังแสงอินพุตในการเกิดไบสเตบิลิตีเชิงแสงที่ระดับ 32.8126 – 37.8145 mW หลังนั้นเมื่อเพิ่มระดับกำลังแสงอินพุตขึ้นมาที่ 40.1888 mW ค่าเอาท์พุตกำลังแสงแบ่งออกเป็น 2 ระดับซึ่งเรียกว่า จุด-ไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบ และที่ระดับกำลังแสงอินพุตที่ 45.1472 mW ค่าเอาท์พุตกำลังแสงแบ่งออกเป็น 2 ระดับอีกครั้งหนึ่งซึ่งจะได้จุดไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบเป็นจุดใหม่และที่ระดับกำลังแสงอินพุต 47.1564 mW ค่าเอาท์พุตกำลังแสงแบ่งออกเป็น 2 ระดับอีกครั้งซึ่งจะได้จุดไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบเป็นจุดใหม่ หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มระดับกำลังแสงอินพุตเพิ่มอีกค่าเอาท์พุตจะกลายเป็นระบบเคออสเชิงแสงเนื่องจากเกิดการแทรกสอดของระดับกำลังอินพุตเพิ่มมากขึ้นและที่ระดับอินพุต 56.0994 mW การแทรกสอดจะลดน้อยลงและที่ระดับกำลังแสงอินพุต 59.5384 mW เกิดอิ่มตัว (saturation) ของการเกิดการแทรกสอดกำลังแสงอินพุต เกิดไบสเตบิลิตีเชิงแสงอีกครั้งเมื่อเพิ่มระดับกำลังแสงอินพุต 59.9478 – 61.3351 mW และเกิดไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบ อีกครั้งที่ระดับกำลังแสงอินพุต 61.1291 mW ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างไบสเต-บิลิตีเชิงแสงเรียกว่าการเกิดอิเคดะอินสเตบิลิตี (Ikeda Instability) และค่าเอาท์พุตกลายเป็นเคออสเชิง-แสงเมื่อเพิ่มระดับกำลังแสงอินพุตขึ้นต่อไปและอิ่มตัวที่ระดับ 67.2180 mW เกิดไบสเตบิลิตีเชิงแสงอีกครั้งที่ระดับกำลังแสงอินพุต 67.8745 – 72.3539 mW และกลายเป็นไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบอีกครั้งที่ระดับอินพุต 71.6678 และ 75.0189 mW ตามลำดับและอิ่มตัวที่ระดับ 91.7397 mW เมื่อเพิ่มระดับกำลังแสงอินพุตเป็น 96.1692 mW จะกลายเป็นเคออสเชิงแสงอีกครั้งและที่ระดับกำลังแสงอินพุต 102.5292

– 105.9736 mW จะเกิดไบสเตบิลิตีเชิงแสงอีกครั้งและกลายเป็นไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบที่ระดับกำลังแสงอินพุต 105.1598 และ 106.9556 mW ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 ไบฟูร์เคชันไดอะแกรมของกำลังแสงเอาท์พุตในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงที่เปลี่ยนแปลงตามกำลังแสงอินพุต เมื่อ n_2 = 3.4 x 10^{-20} m^2/W a) กำลังแสงเอาท์พุตกับจำนวนลูปโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวน b) กำลังแสงเอาท์พุตกับกำลังแสง

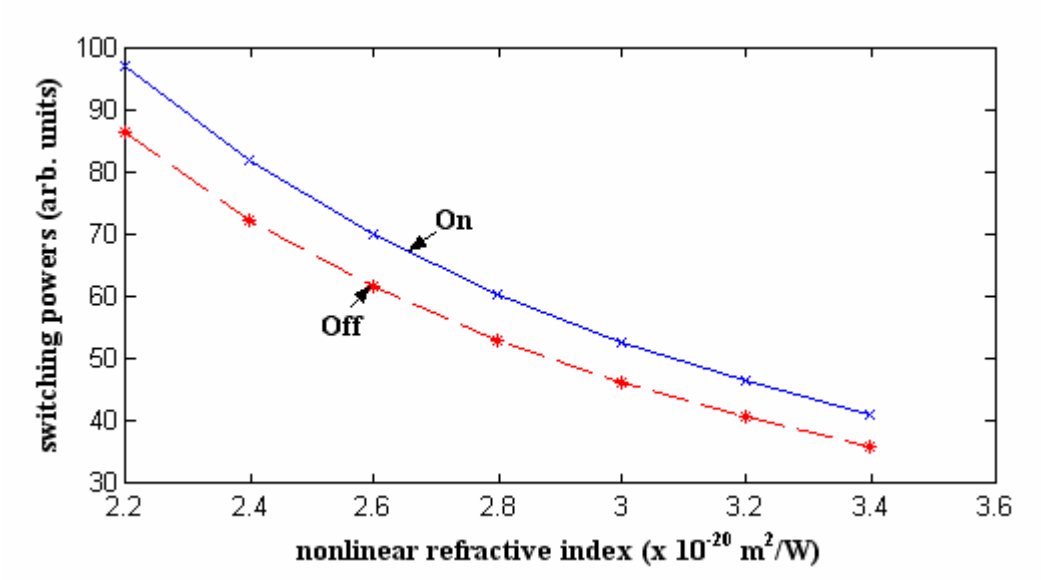
จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าดัชนีหักเหแบบไม่เชิงเส้นที่ขึ้นกับกำลังแสงอินพุตมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.2 x 10^{-20} m^2/W - 3.4 x 10^{-20} m^2/W นั้นระดับกำลังแสงอินพุตของบริเวณการเกิดไบสเตบิลิตีเชิงแสงจะลดลงตามลำดับหรือกล่าวได้ว่าเมื่อค่าดัชนีหักเหแบบไม่เชิงเส้นเพิ่มขึ้น ระดับกำลังแสงอินพุตในการเกิดบริเวณไบสเตบิลิตีเชิงแสงก็จะเกิดได้เร็วกว่า ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการประยุกต์ใช้เป็นสวิตซ์เชิงแสงและการเกิดไบฟูร์เคชันและเคออสเชิงแสงนั้นสามารถควบคุมได้โดยการควบคุมระดับกำลังแสงอินพุตให้พอดีกับการเกิดเฉพาะบริเวณไบสเตบิลิตีเชิงแสงเท่านั้น สำหรับการควบคุมปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นนั้นทำการควบคุมระดับกำลังแสงอินพุตให้เหมาะสม กล่าวคือต้องให้เกิดเฉพาะบริเวณไบ-สเตบิลิตีเชิงแสงเท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสง ที่ได้ควบคุมกำลังแสงอินพุตให้เกิดเฉพาะบริเวณไบสเตบิลิตีเชิงแสง

4.3 ผลของการเกิดสวิตซิงกำลังแสงเมื่อค่าดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.14 แสดงค่าอินพุตกำลังแสงของบริเวณไบสเตบิลตีเชิงแสงที่เปลี่ยนแปลงตามค่าดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ขึ้นกับกำลังแสงอินพุต ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อค่าดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพิ่มขึ้นค่าอินพุตกำลังแสงในบริเวณการเกิดไบสเตบิลิตีเชิงแสงนั้นจะลดลง นั่นคือแสดงให้เห็นว่าค่าอินพุตกำลังแสงในการทำเกิดสวิตซ์เปิดหรือสวิตซ์ปิดนั้นเมื่อค่าดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพิ่มขึ้นจะใช้ค่าอินพุตกำลังแสงในการปั๊มลดลงตามค่าดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.14 กำลังแสงสวิตซ์-เปิด (เส้นสีน้ำเงิน) และสวิตซ์-ปิด (เส้นสีแดง) ที่ลดลงเมื่อเพิ่มค่าดัชนีหัก-เหแบบไม่เป็นเชิงเส้น

4.4 ผลการทดลองของอุปกรณ์ตัวแยกความยาวคลื่นแบบหลาย ความยาวคลื่นแบบวงแหวนที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น

4.4.1 ตัวแยกสัญญาณแสงแบบหลายช่องสัญญาณ (Optical Router)

แสงที่เป็นสัญญาณขาเข้าในโพรงสั่นพ้องขนาดเล็กที่มีสนามพลังงานที่คงที่ (Constant light field Amplitude: E_0) และเราออกแบบอุปกรณ์แยกสัญญาณแสงได้จากรูปที่ 4.15 ซึ่งประกอบไปด้วยตัวแปรที่สำคัญ คือ การลดทอนแสงขณะที่อยู่ในโพรงสั่นพ้อง (Attenuation :α) และ ค่าคงที่เฟส phase constants (ϕ_0) ซึ่งผลการทดลองจะแสดงผลเป็นทั้งโดเมลเวลา และโดเมนความถี่ ดังสมการที่ 4.1

$$E_{in}(t) = E_0 \exp^{-\alpha L + j\phi_0(t)}. \qquad (4.1)$$

เมื่อ L คือ ระยะทางในการส่งผ่านแสงในท่อนำคลื่น a propagation distance (waveguide length).

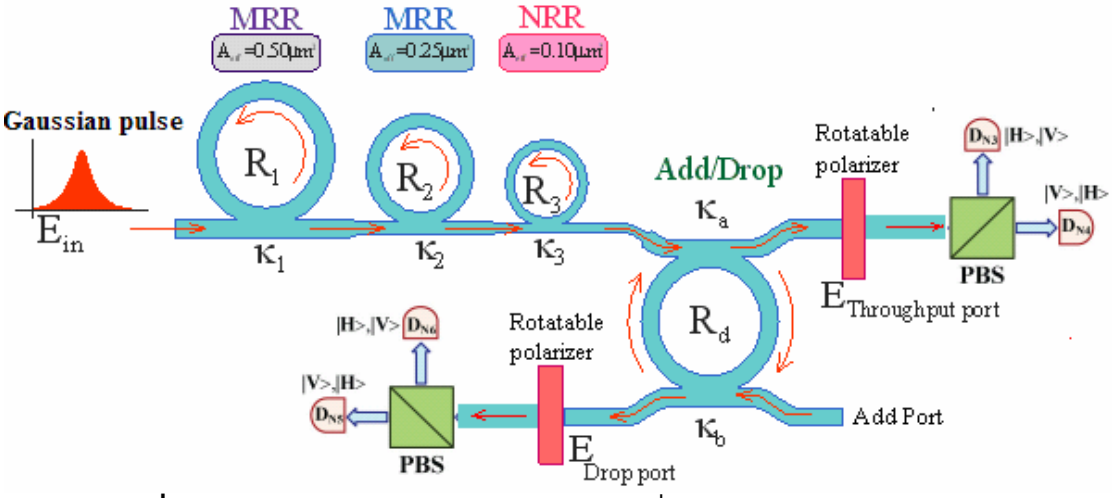
การเกิดสัญญาณแสงแบบไม่เป็นเชิงเส้นนั้นอาจจะเกิดจากปารกฏการณของวัสดุแบบเคอร์ (Kerr-type) ดังสมการของสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Refractive index : n)ดังสมการที่ 4.2

$$n = n_0 + n_2 I = n_0 + (\frac{n_2}{A_{eff}})P, \qquad (4.2)$$

เมื่อ n_0 และ n_2 คือ สัมประสิทธิการสะท้อนแบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น

I คือ ความเข้มของแสง วัตต์ (W)

A_{eff} คือ พื้นที่หน้าตัดของคอร์ในอุปกรณ์โพรงสั่นพ้อง ซึ่งอยู่ในช่วง 0.10 to 0.50 μm^2 [12]



รูปที่ 4.15 แสดงอุปกรณ์กำเนิดสัญญานความถี่สูง และอุปกรณ์แยกสัญญาณแสงแบบหลายช่องสัญญาณขนาดเล็ก

เมื่อสัญญาณขาเข้าแสงแบบเกาส์ (Gaussian pulse) ถูกส่งเข้ามายังอุปกรณ์โพรงสั่นพ้องขนาดเล็กและทั้ง 3 วงแหนว ซึ่งจะเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นขึ้น (Kerr-effect) ซึ่งเราเรียกว่า เคออส (Chaos) และอุปกรณ์แยกแสง (Add/Drop Filter) ทำหน้าที่แยกสัญญาณแสงออกเป็นหลายความยาวคลื่น ดังรูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ดังกล่าวของ สัญญาณขาเข้าและสัญญาณขาออก ($E_{out}(t)$ และ $E_{in}(t)$) ดังแสดงในสมการที่ 4.3 [13]

$$\left|\frac{E_{out}(t)}{E_{in}(t)}\right|^2 = (1-\gamma)\left[1-\frac{(1-(1-\gamma)x^2)\kappa}{(1-x\sqrt{1-\gamma}\sqrt{1-\kappa})^2+4x\sqrt{1-\gamma}\sqrt{1-\kappa}\sin^2(\frac{\phi}{2})}\right] \qquad (4.3)$$

จากสมการที่ 4.3 มีพื้นฐานจากหลักการของ เฟอร์บีร์-เพโรท์ (Fabry-Perot cavity), ซึ่งสัญญาณขาเข้าจะใช้กระจกสะท้อนกลับไปกลับมาอย่างเป็นระบบ (1-κ), κ คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Coupling coefficient) และ $x = \exp(-\alpha L/2)$ คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียใน 1 รอบการเคลื่อนที่อนุภาคของแสง(Roundtrip loss coefficient), $\phi_0 = kLn_0$ และ $\phi_{NL} = kL(\frac{n_2}{A_{eff}})P$ คือ ความเป็นเชิงเส้นและความไม่เป็นเชิงเส้นของเฟสชิฟ และ $k = 2\pi/\lambda$ คือ จำนวนลำดับคลื่นในสูญกาศ

(Wave propagation number in a vacuum) L คือ ความยาวของท่อนำคลื่นแสงขนาดเล็ก (Waveguide length) และ α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Linear absorption coefficient)

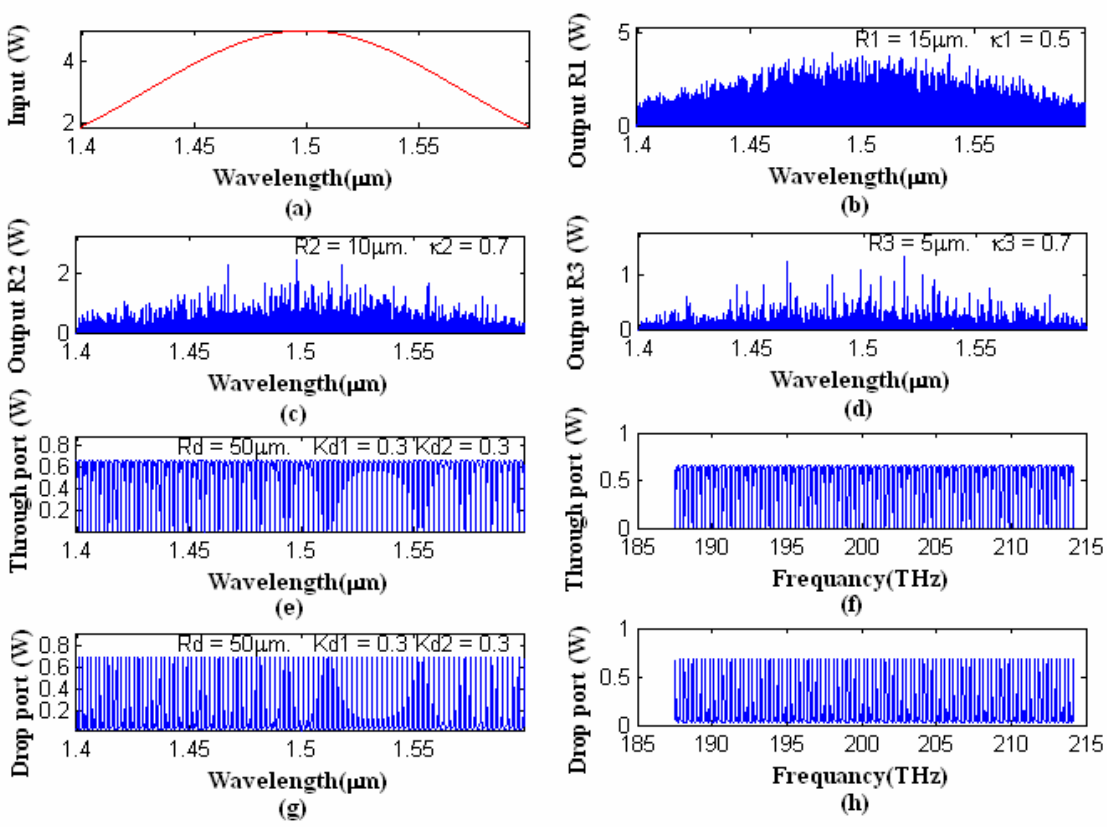
ในงานวิจัยฉบับนี้จะใช้สมการที่4.3 ในการทดลองหาสัญญาณที่สมบูรณ์ และดีที่สุดในการออกแบบอุปกรณ์แยกแสงแบบหลายช่องสัญญาณ ในทำนองเดียวกันเราสามารถเชื่อมต่อกับระบบของการสื่อสารแบบใช้เส้นใยแก้วนำแสงได้ สัญญาณขาเข้าของสนามแสงแสดงดังสมการที่ 4.1 คือ สัญญาณแสงแบบเกาส์ ซึ่งเป็นสัญญาณแสงแบบเชิงเส้น จากสมการที่มีตัวแปรทำให้เกิดสัญญาณที่ไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อเกิดสัญญาณ เคออส จากสมการที่ 4.2 ซึ่งสามารถสร้างสัญญาณรบกวนแบบ เคออส และกรองความยาวคลื่นที่มีมากมายโดยใช้อุปกรณ์แยกสัญญาณแบบหลายความยาวคลื่น (Add/drop filter device) ซึ่งสามารถคำนวนได้จากสมการที่ (4.4) และ (4.5)

$$\left|\frac{E_t}{E_{in}}\right|^2 = \frac{(1-\kappa_1)-2\sqrt{1-\kappa_1}\cdot\sqrt{1-\kappa_2}\,e^{-\frac{\alpha}{2}L}\cos(k_nL)+(1-\kappa_2)e^{-\alpha L}}{1+(1-\kappa_1)(1-\kappa_2)e^{-\alpha L}-2\sqrt{1-\kappa_1}\cdot\sqrt{1-\kappa_2}\,e^{-\frac{\alpha}{2}L}\cos(k_nL)} \qquad (4.4)$$

และ

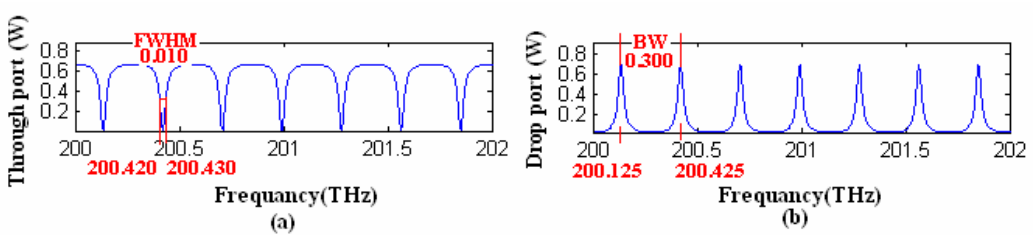
$$\left|\frac{E_d}{E_{in}}\right|^2 = \frac{\kappa_1\kappa_2 e^{-\frac{\alpha}{2}L}}{1+(1-\kappa_1)(1-\kappa_2)e^{-\alpha L}-2\sqrt{1-\kappa_1}\cdot\sqrt{1-\kappa_2}\,e^{-\frac{\alpha}{2}L}\cos(k_nL)} \qquad (4.5)$$

เมื่อ E_t และ E_d สนามแสงขาออกของทางด้านส่งผ่าน (Throughput port) และ ทางด้านขาออกด็อป (Drop port) จากการส่งผ่านทางขาออกสามารถควบคุม และเลือกค่าที่ดีที่สุดโดยสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน(Coupling ratio) ของโพรงสั่นพ้องขนาดเล็ก [14]. เมื่อ $\beta = kn_{eff}$ คือ ค่าคงที่ของการแพร่กระจายคลื่น (Propagation constant), n_{eff} คือ สัมประสิทธิการสะท้อน (Refractive index) ของอุปกรณ์ท่อนำคลื่น และ ความยาวโดยรอบโพรงสั่นพ้องขนาดเล็ก คือ $L = 2\pi R$, เมื่อ R คือ รัศมีของโพรงสั่นพ้องขนาดเล็ก ส่วนค่าพารามิเตอร์พิเศษที่ใช้ในการออกแบบ ดังนี้ $\phi = \beta L$ คือ ค่าคงที่ของเฟส (Phase constant) เราสามารถควบคุมการเกิดสัญญาณผิดรูปแบบเคออสโดยใช้อุปกรณืแยกสัญญาณแสงแบบ แอ็ด-ด็อป (Add/drop device) ซึ่งสัญญาณที่ได้จะถูกแยกออกเป็นหลายความยาวคลื่นจากปรากฏการณ์เคอร์ และปรากฏการณ์ (Four wave mixing :FWM), โดยเราเพียงปรับเปลี่ยน สัมประสิทธิการสะท้อนของอุปกรณ์แยกความยาวคลื่นทั้ง 2 ตัว คือ K_1 และ K_2 คือ (Coupling coefficient of add/drop filters), $k_n = 2\pi/\lambda$ คือ ลำดับของการแพร่กระจายคลื่นในสูญกาศ (Wave propagation number for in a vacuum) และ การสูญเสียในท่อนำคลื่น (waveguide ring resonator loss) คือ α = 0.5 dBmm^{-1}. สัปประสิทธิการสูญเสียของการส่งผ่าน(Coupler intensity loss) คือ γ = 0.1.

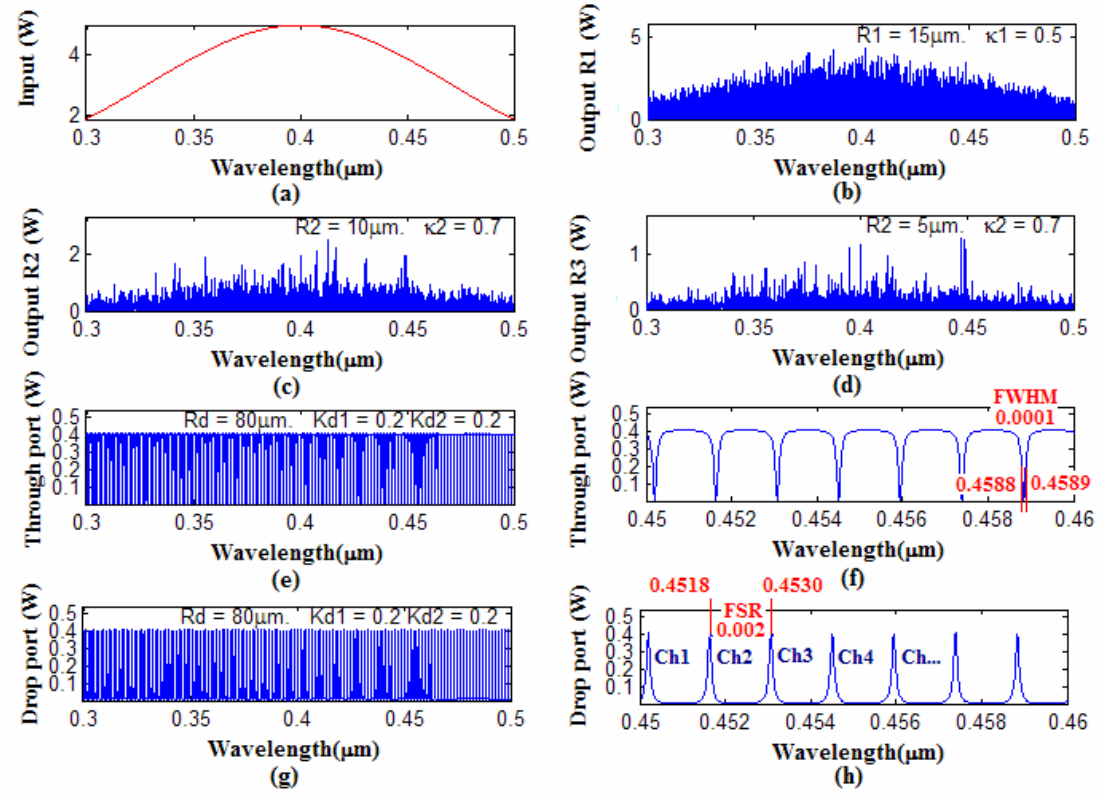


รูปที่ 4.16 แสดงสัญญาณขาออกของระบบอุปกรณ์แยกแสงที่มีความยาวคลื่นที่ 1.5μm.

ในรูปที่ 4.16 แสดงผลการทดลองของระบบแยกสัญญาณแสงที่มีสัญญาณขาเข้าแบบเกาว์เซี่ยนที่ความเข้มของสัญญาณ 5 วัตต์ ในรูปที่ 4.16(a) สัญญาณขาออกที่อุปกรณ์โพรงสั่นพ้องแรก (First ring :R_1) คือสัญญาณเคออส และ ถูกกำจัดออกโดยอุปกรณ์โพรงสั่นพ้องตัวที่ 2 (Second ring :R_2) และ อุปกรณ์โพรงสั่นพ้องตัวที่ 3 (Third ring: R_3) ส่วนค่าพารามิเตอร์ของโพรงสั่นพ้องทั้ง 3 ตัวคือ 15μm, 10 μm and 5 μm สำหรับ R_1-R_3 แสดงดังรูปที่ 4.16(b-d) และ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนทั้ง 3 วง คือ 0.5, 0.7 and 0.7 ซึ่งเราใช้ความยาวคลื่นกลางที่ 0.6 μm ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (e) และ 4.16 (g) แสดงสัญญาณขาออกที่ ทรูซ์พุตท์ พอร์ตและสัญญาณขาออกที่ ด็อป พอร์ต โดยที่ขนาดของรัศมีของอุปกรณ์แยกความยาวคลื่น คือ 50μm ซึ่งสัญญาณแสดงรูปที่ 4.16(f) และ 4.16(h) แสดงการเปลี่ยนโหมดความยาวคลื่น เป็น โมดความถี่ ซึ่งที่ความถี่ในช่วงระหว่าง 187-214 THz และความกว้างครึ่งหนึ่งของพัลซ์ (Full width at half maximum: FWHM) คือ 0.010 THz and the band width: BW is 0.300 THz แสดงดังรูปที่ 4.17 (a-b) และ ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์แยกความยาวคลื่นแสงมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนทั้ง 2 ค่า (Add/drop device couple coefficient) คือ 0.3 (κ_{d1} and κ_{d2}).

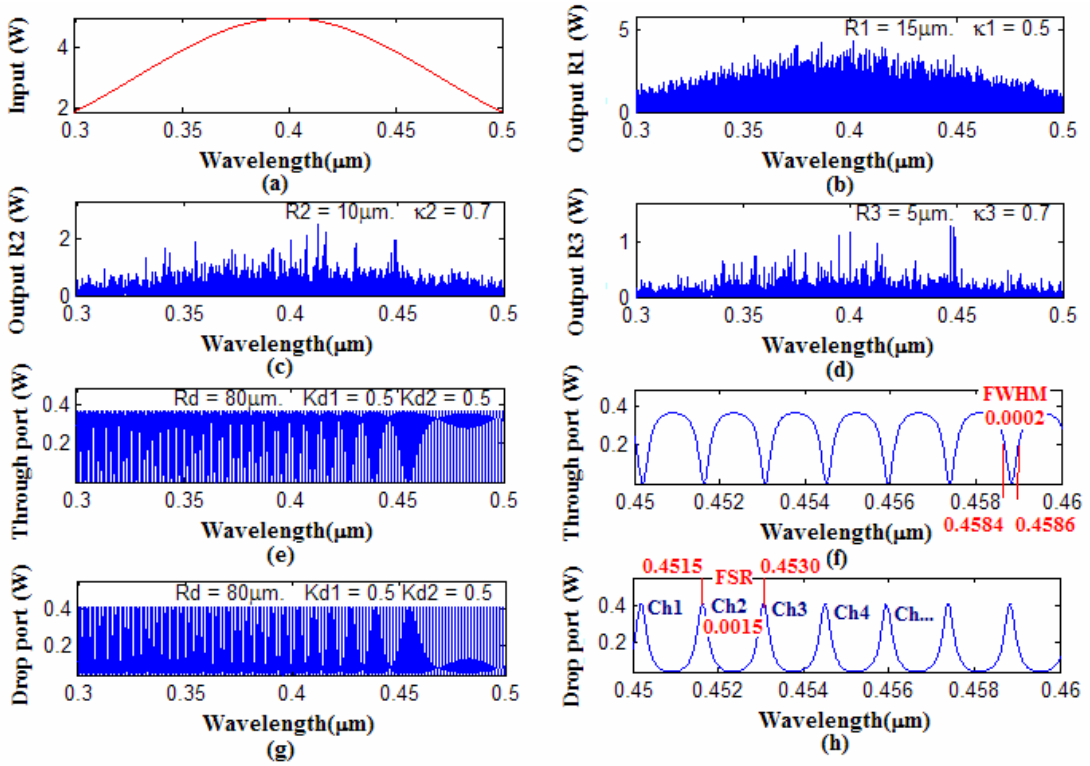


รูปที่ 4.17 แสดงการขยายภาพความถี่ของสัญญาณขาออกของ Thought port และ Drop port ที่โหมดความถี่ ในช่วงความถี่ 200-214 THz



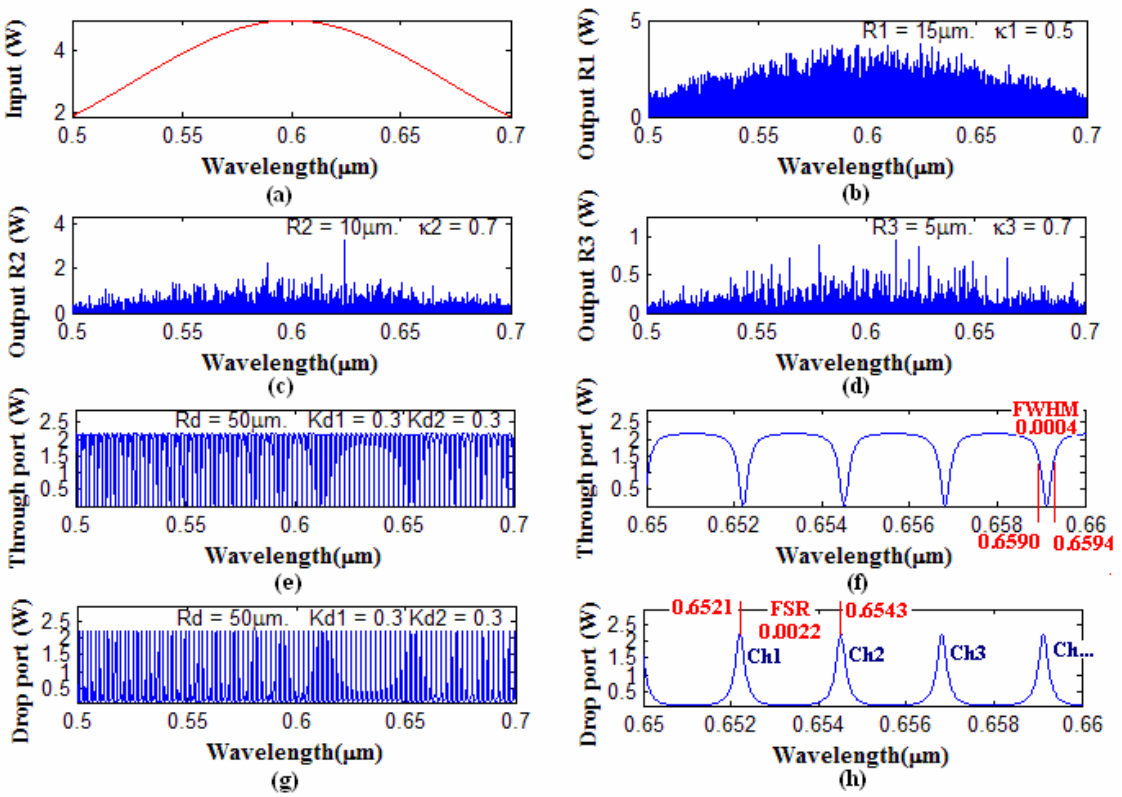
รูปที่4.18 แสดงสัญญาณขาออกของอุปกรณ์โพรงสั่นพ้องขนาดเล็ก และ อุปกรณ์แยกความยาวคลื่นแสง ที่ความยาวคลื่นกลาง คือ 0.4μm และ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของอุปกรณ์แยกความยาวคลื่น κ_{d1} และ κ_{d2} คือ 0.2

จากรูปที่4.18 สัญญาณขาเข้าเป็นสัญญาณแสงแบบเกาส์ ที่ความเข้ม 5 วัตต์ ความยาวคลื่นกลาง 400 นาโนเมตร และสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์โพรงสั่นพ้องทั้ง 3 วงแหวนเป็นสัญญาณแบบไม่เป็นเชิงเส้นแบบเคออสที่เกิดจากปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr-effect) ดังรูป 4.18(b-d) สัญญาณขาออกที่ทรูต์พุทต์ พอร์ต และเป็นการขยายสัญญาณในช่วงความยาวคลื่น 0.45 -0.46 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 4.18(e-f) สัญญาณขาออกที่ด็อปร์ พอร์ต และเป็นการขยายสัญญาณในช่วงความยาวคลื่น 0.45 -0.46 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 4.18(g-h) ที่มีความเข้มที่ 0.4 วัตต์ และได้สัญญาณครึ่งคลื่นที่ 0.0001 ไมโครเมตรดังรูปที่ 4.18(f) ส่วนค่าระยะห่างระหว่างพัลส์ (Free spectrum range: FSR) คือ 0.002 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.18(h)



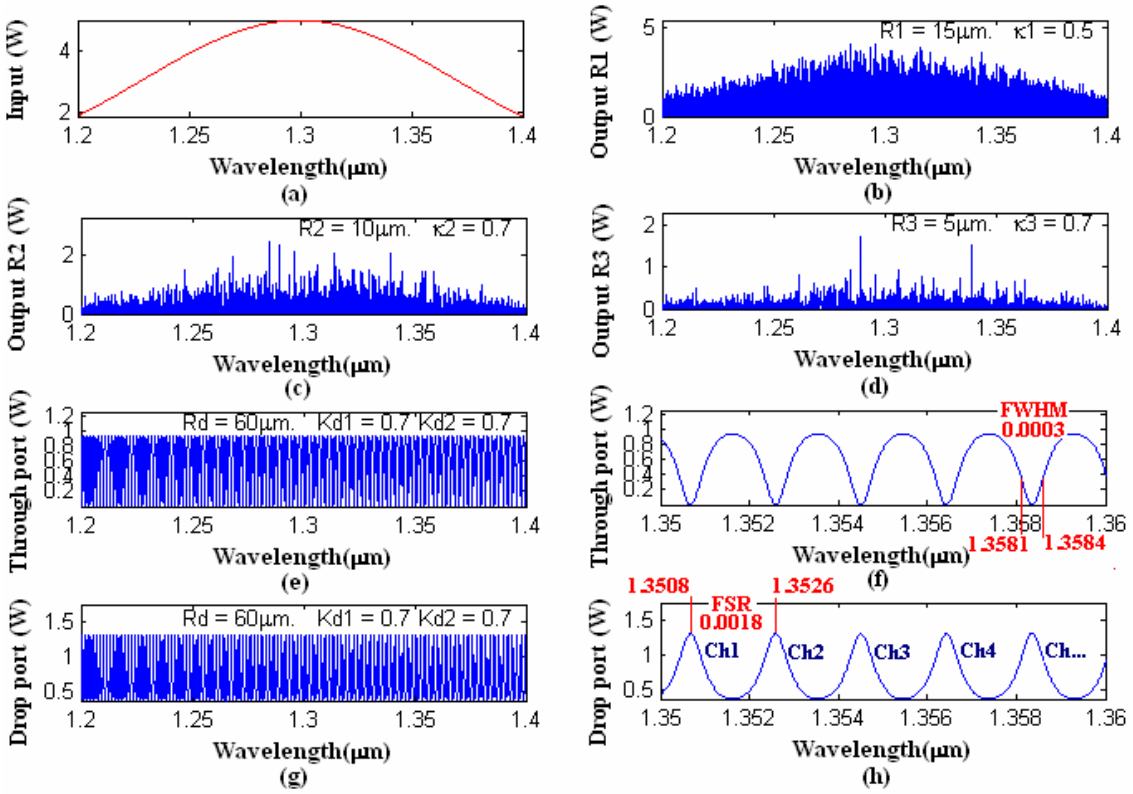
รูปที่4.19 แสดงสัญญาณขาออกของอุปกรณ์โพรงสั่นพ้องขนาดเล็ก และ อุปกรณ์แยกความยาวคลื่นแสง ที่ความยาวคลื่นกลาง คือ 0.4μm และ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของอุปกรณ์แยกความยาวคลื่น κ_{d1} และ κ_{d2} คือ 0.5

จากรูปที่4.19 สัญญาณขาเข้าเป็นสัญญาณแสงแบบเกาส์ ที่ความเข้ม 5 วัตต์ ความยาวคลื่นกลาง 400 นาโนเมตร และสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์โพรงสั่นพ้องทั้ง 3 วงแหวนเป็นสัญญาณแบบไม่เป็นเชิงเส้นแบบเคออสที่เกิดจากปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr-effect) ดังรูป 4.19(b-d) สัญญาณขาออกที่ทรูต์พุทต์ พอร์ต และเป็นการขยายสัญญาณในช่วงความยาวคลื่น 0.45 -0.46 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 4.19(e-f) สัญญาณขาออกที่ด็อปร์ พอร์ต และเป็นการขยายสัญญาณในช่วงความยาวคลื่น 0.45 -0.46 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 4.19(g-h) ที่มีความเข้มที่ 0.4 วัตต์ และได้สัญญาณครึ่งคลื่นที่ 0.0002 ไมโครเมตรดังรูปที่ 4.19(f) ส่วนค่าระยะห่างระหว่างพัลส์ (Free spectrum range: FSR) คือ 0.0015 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.19(h) ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นว่าผลของการปรับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของอุปกรณ์แยกความยาวคลื่นมีผลต่อความยาวคลื่นขาออกของอุปกรณ์แยกความยาวคลื่นแสง



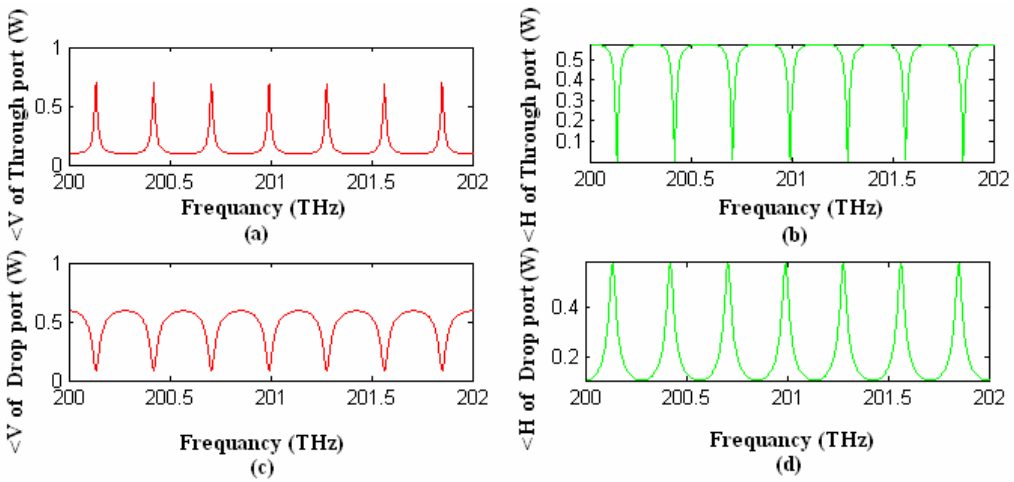
รูปที่4.20 แสดงสัญญาณขาออกของอุปกรณ์โพรงสั่นพ้องขนาดเล็ก และ อุปกรณ์แยกความยาวคลื่นแสง ที่ความยาวคลื่นกลาง คือ 0.6 μm และ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของอุปกรณ์แยกความยาวคลื่น κ_{d1} และ κ_{d2} คือ 0.3

จากรูปที่4.20 สัญญาณขาเข้าเป็นสัญญาณแสงแบบเกาส์ ที่ความเข้ม 5 วัตต์ ความยาวคลื่นกลาง 600 นาโนเมตร และสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์โพรงสั่นพ้องทั้ง 3 วงแหวนเป็นสัญญาณแบบไม่เป็นเชิงเส้นแบบเคออสที่เกิดจากปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr-effect) ที่มีสัมประสิทธิ์การส่งผ่านดังนี้ κ_1=0.5 κ_2=0.7 และ κ_3=0.7 ดังรูป 4.18(b-d) สัญญาณขาออกที่ทรูต์พุทต์ พอร์ต และเป็นการขยายสัญญาณในช่วงความยาวคลื่น 0.65 -0.66 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 4.20(e-f) สัญญาณขาออกที่ด็อปร์ พอร์ต และเป็นการขยายสัญญาณในช่วงความยาวคลื่น 0.65 -0.66 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 4.20(g-h) ที่มีความเข้มที่ 0.22 วัตต์ และได้สัญญาณครึ่งคลื่นที่ 0.0004 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.18(f) ส่วนค่าระยะห่างระหว่างพัลส์ (Free spectrum range: FSR) คือ 0.0022 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.18(h) และช่องสัญญาณที่สามารถแยกได้ คือ 1,000 ช่องสัญญาณ



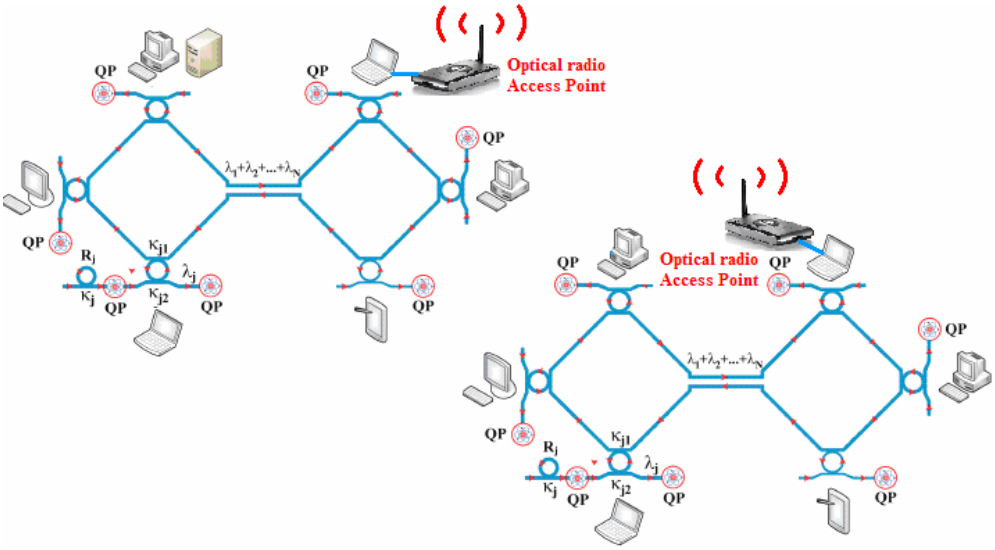
รูปที่4.21 แสดงสัญญาณขาออกของอุปกรณ์โพรงสั่นพ้องขนาดเล็ก และ อุปกรณ์แยกความยาวคลื่นแสง ที่ความยาวคลื่นกลาง คือ 1.3 μm และ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของอุปกรณ์แยกความยาวคลื่น κ_{d1} และ κ_{d2} คือ 0.7

จากรูปที่4.21 สัญญาณขาเข้าเป็นสัญญาณแสงแบบเกาส์ ที่ความเข้ม 5 วัตต์ ความยาวคลื่นกลาง 1,300 นาโนเมตร และสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์โพรงสั่นพ้องทั้ง 3 วงแหวนเป็นสัญญาณแบบไม่เป็นเชิงเส้นแบบเคออสที่เกิดจากปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr-effect) ที่มีสัมประสิทธิ์การส่งผ่านดังนี้ κ_1=0.5 κ_2=0.7 และ κ_3=0.7 ส่วนความยาวของรัศมีของโพรงสั่นพ้อง คือ 15 ไมโครเมตร 10ไมโครเมตร และ 5 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังรูป 4.21(b-d) สัญญาณขาออกที่ทรูต์พุทต์ พอร์ต และเป็นการขยายสัญญาณในช่วงความยาวคลื่น 1.20 -1.40 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 4.21(e-f) สัญญาณขาออกที่ด็อปร์ พอร์ต และเป็นการขยายสัญญาณในช่วงความยาวคลื่น 1.35 -1.36 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 4.21(g-h) ที่มีความเข้มที่ 1.25 วัตต์ และได้สัญญาณครึ่งคลื่นที่ 0.0003 ไมโครเมตรดังรูปที่ 4.21(f) ส่วนค่าระยะห่างระหว่างพัลส์ (Free spectrum range: FSR) คือ 0.0018 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.21(h) และช่องสัญญาณที่สามารถแยกได้ ประมาณ 1,200 ช่องสัญญาณ



รูปที่ 4.22 ผลการทดลองที่ขยายสัญญาณทางควอนตัมแสงจากรูปที่ 4.15 ที่ความยาวคลื่นกลาง 1.5 ไมโครเมตร

ในรูปที่ 4.22 แสดงผลจากการทดลองการเข้ารหัสแบบควอนตัม โดยแยกความยาวคลื่นโดยใช้อุปกรณ์ (Add/Drop device)โดยใช้อุปกรณีแยกแสงแบบขั้ว (Polarizer beam splitter :PBS) ทางด้านขาออก ทรูซ์ พอร์ต ($|V\rangle,|H\rangle$) ดังแสดงในรูปที่ 4.22 (a) และ รูปที่ 4.22 (b) ซึ่งทางด้านสัญญาณขาออกมีความเข้มแสง 2 วัตต์ และ 1.6 วัตต์ และสัญญาณแสงที่แอ็ด ด็อปร์ พอร์ต(Drop port) ($|V\rangle,|H\rangle$) แสดงในรูปที่ 4.22 (c) และรูปที่4.22 (d) เมื่อสัญญาณขาออกมีกำลังแสงthe 0.65 วัวต์ และ 0.6 วัตต์ ในทำนองเดียวกันส่วนของการเชื่อมต่อสัญญาณที่ได้จะต่อขนานกันกับระบบส่งสัญญาณแบบควอนตัม โดยสัญญาณขาเข้าเป็นเกาส์ พัลส์ โดยจะเชื่อมต่อกับระบบเดิมที่มีอยู่เพื่อเพิ่มความปลอดภัยของข้อมูล ผ่านตัวแยกสัญญาณความยาวคลื่นแบบหลายช่องสัญญาณ (Optical multiplexer) ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.23 คือ ระบบการสื่อสารข้อมูลควอนตัมหลายช่องสัญญาณแบบไร้สาย (Quantum optical wireless security system)



รูปที่ 4.23 ระบบ การสื่อสารข้อมูลควอนตัมหลายช่องสัญญาณแบบไร้สาย โดยอุปกรณ์แยกช่องสัญญาณแสง เมื่อ QP คือ Quantum Processor, R_j คือ ring radii, λ_i คือ output wavelength และ κ_j , κ_{ji} คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของอุปกรณ์แยกสัญญาณแสง (Coupling coefficients)

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปเอาท์พุตกำลังแสงในระบบโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสง

ลักษณะเอาท์พุตกำลังแสงเมื่อปั๊มอินพุตกำลังแสงแบบแสงมีดโซลิตอนที่ระดับอินพุตต่ำๆค่าเอาท์พุตแสงจะแปรผันตรงกับอินพุต แต่เมื่อระดับอินพุตกำลังแสงเพิ่มขึ้นจะเกิดไบสเตบิลิตีเชิงแสง ไบฟูร์เคชันแบบ 2 คาบ และเคออสเชิงแสง ตามลำดับ

5.2 สรุปผลของดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น

ลักษณะเอาท์พุตกำลังแสงเมื่อค่าดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพิ่มขึ้นตามกำลังแสงอินพุต พบว่าปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดขึ้นในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงจะเกิดเร็วขึ้นเมื่อค่าดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพิ่มขึ้น นั่นคือการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นจะเกิดที่ระดับอินพุตกำลังแสงต่ำๆ บริเวณไบสเตบิลิตีเชิงแสงและบริเวณอิเคดะอินสเตบิลิตีจะที่ระดับกำลังแสงอินพุตน้อยลงหรือกล่าวได้ว่าเมื่อ n_2 เพิ่มขึ้นระดับอินพุตกำลังแสงที่ใช้ก็จะลดลงตามลำดับดังสรุปผลการจำลองในตารางที่ 5.1

5.3 สรุปผลของการเกิดสวิตซิงกำลังแสงเมื่อค่าดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพิ่มขึ้น

จากการวิจัยพบว่าเมื่อค่าดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพิ่มขึ้นการเกิดสวิตซิงกำลังแสงจะลดลง (เกิดเร็วขึ้น) นั่นคือใช้กำลังอินพุตในการปั๊มสวิตซิงกำลังแสงน้อยลงหรือกล่าวได้ว่าเมื่อค่าดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพิ่มขึ้นเวลาที่ใช้ในการสวิตซ์กำลังแสงจะลดลง

ตารางที่ 5.1 สรุปช่วงกำลังแสงอินพุตของการเกิดไบสเตบิลิตีเชิงแสง และอิเคดะอินสเตบิลิตี ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้น (n_2) โดยที่สัมประสิทธิ์การคัปปลิงแสง (κ) เท่ากับ 0.0225

ดัชนีหักเหไม่เป็นเชิงเส้น (n_2) (m^2/W)	บริเวณไบสเตบิลิตี, P_{in} (mW)	บริเวณอิเคดะอินสเตบิลิตี P_{in} (mW)
2.2×10^{-20}	78.2992- 90.1805	96.7471 – 218.2151
2.4×10^{-20}	66.0386 – 75.5461	81.1050 – 183.8132
2.6×10^{-20}	56.1938 – 64.3674	69.1107 – 156.7922
2.8×10^{-20}	48.4060 – 55.6175	59.7174 – 135.1773
3.0×10^{-20}	42.1540 – 48.5007	51.8639 – 117.4108
3.2×10^{-20}	37.048 – 42.6642	45.4912 – 103.4991
3.4×10^{-20}	32.8126 – 37.8145	40.1888 – 91.7397

5.4 สรุปตัวแยกสัญญาณแสงแบบหลายช่องสัญญาณ (Optical Router)

ในการวิจัยผู้วัจัยเสนอหลักการออกแบบอุปกรณ์แยกแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่ใช้หลักการของความไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear effect) ซึ่งจะเกิดขึ้นกับสารกึ่งตัวนำที่มาใช้กับการออกแบบคือ InAlGaAs/InP ซึ่งขึ้นกับตัวแปรหลายค่าเช่น ค่าดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้น (n_2) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของโพรงสั่นพ้องทั้ง 3 วงแหวน (Refective index of ring resonator : κ) และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของอุปกรณ์แยกความยาวคลื่นแสงทั้ง 2 ด้าน (Refective index of Add/Drop device: κ_a และ κ_b) ซึ่งจะเห็นได้จากการทดลอง และเรายังสามารถประยุกต์ใช้ระบบดังกล่าวนี้กับงานอื่นๆได้ เช่น การเข้ารหัสแสงแบบควอนตัม และการเปลี่ยนความยาวคลื่นของตัวแยกช่องสัญญาณสำหรับผู้ใช้หลายผู้ใช้โดยการเข้ารหัสควอนตัมกับเครือข่าย ซึ่งในอนาคอันใกล้เราอาจจะต้องเปลี่ยน หรือ พัฒนาระบบให้รองรับระบบควอนตัมคอมพิวเตอร์ ซึ่งการสื่อสารที่ใช้ความถี่สูง (THz communication) ความจุของข้อมูลมหาศาล และต้องการความปลอดภัยในข้อมูลสูง ซึ่งปัจจุบันการสื่อสารทางแสงเท่านั้นสามารถใช้ความถี่สูงขนาดนั้นได้ (50-100 THz) เพื่อเป็นการรองรับระบบที่กำลังจะเกิดขึ้นในเวลาอันใกล้นี้ การใช้อุปกรณ์การสื่อสารแบบใหม่ ขนาดเล็ก ต้นทุนต่ำจำเป็นอย่างมาก

5.5 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาต่อไป

ในการวิจัยนี้เป็นการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB version 2010a เพียงโปรแกรมเดียว โดยไม่ได้จำลองผลโดยใช้โปรแกรมอื่นๆที่มีความเสถียรมากกว่ารวมทั้งเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการจำลองและอาจจะต้องใช้โปรแกรมเสมือนจริงที่ราคาสูงขึ้นและสามารถประยุกต์ได้มากขึ้น และการออกแบบอาจจะสามารถต่อยอดผลิตได้อุปกรณ์จริงได้หากมีทุนสนับสนุนเพียงพอ และอาจจะต้องทำความตกลงร่วมกันระหว่างสถาบันวิจัยและบริษัทผู้สนับสนุนผลิตให้เป็นเชิงพาณิชย์ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] E. B. Aleksandrov, M. V. Balabas, A. K. Vershovskii and A. S. Pazgalev, “Multiple-quantum radio-frequency spectroscopy of atoms: Application to the metrology of geomagnetic fields”, Technical Physics ,44, (1999), 27–30.

[2] R. Aguado and L. P. Kouwenhoven, “Double Quantum Dots as Detectors of High-Frequency Quantum Noise in Microscopic Conductors”, Phys. Rev. Lett. 84, (2000),1986–1989.

[3] O. Legrand, C. Schmit and D. Sornette , “Quantum Chaos Methods Applied to High-Frequency Plate Vibrations”, EPL: Europhysics Letters, (1992) ,101-104.

[4] Clinton B. Carlisle, David E. Cooper, and Horst Preier, "Quantum noise-limited FM spectroscopy with a lead-salt diode laser," Appl. Opt. 28, (1989), 2567-2576.

[5] S. M. Kim, Y. Wang, M. Keever, and J. S. Harris, “High-Frequency Modulation Characteristics of 1.3-μm InGaAs Quantum Dot Lasers”, IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS,16,(2004),377-379.

[6] A. Gupta, G. Chen, P. Joshi, S. Tadigadapa, and P.C. Eklund , “Raman Scattering from High-Frequency Phonons in Supported n-Graphene Layer Films” , Nano Lett.,6, (2006), 2667–2673.

[7] S. Kim, G.P. Nordin, J. Cal and J. Jiang, “Ultarcompact high-efficiency polarizing beam splitter with a hybrid photonic crystal and conventional waveguide structure” Opt. Lett., 281, (2003),2384-2386.

[8] T. Zhang, X. F. Mo, Z. F. Han, G. C. Guo, “Extensible router for a quantum key distribution network”, Phys. Lett.,A, 372 (2008) 3957-3959.

[9] B. S. Ham “A novel method of all-optical switching: quantum router”, ETRI Journal, 23(2001)106-110.

[10] T. Zhang, Z. F. Han, X. F. Mo, and G. C. Guo, “Extensible router for multi-user quantum key distribution network”, (2006), quant-ph/0608238vl.

[11] Y. Kokubun, Y. Hatakeyama, M. Ogata, S. Suzuki, and N. Zaizen, “Fabrication technologies for vertically coupled micro ring resonator with multilevel crossing busline and ultracompact-ring radius”, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 11(2005)4–10.

[12] S. Mithata, N. Pornsuwancharoen and P.P. Yupapin, A simultaneous short wave and millimeter wave generation using a soliton pulse within a nano-waveguide, IEEE Photon. Technol. Lett., 21(13)(2009)932-934.

[13] P.P. Yupapin and W. Suwancharoen, “Chaotic signal generation and cancellation using a microring resonator incorporating an optical add/drop multiplexer,” Opt. Commun., 280(2)(2007)343-350.

[14] P.P. Yupapin, P. Saeung and C. Li, “Characteristics of complementary ring-resonator add/drop filters modeling by using graphical approach”, Opt. Commun., 272(2007)81-86.

[15] P.P. Yupapin and S. Mitatha, Multi-users Quantum Key Distribution via Wavelength Routers in an Optical Network, Recent Patents on Computer Science, 2(1)(2009)14-20.

[16] T. S. Manderbach, H. Weier, M. Furst, R. Ursin, F. Tiefenbacher, T. Scheidl, J. Perdigues, Z. Sodnik, C. Kurtsiefer,J. G. Rarity, A. Zeilinger and H. Weinfurter, “Experimental demonstration of free-space decoy-state quantum key distribution over 144 km,” Phys. Rev. Lett., 98(2007)010504.

[17] S. Suchat, W. Khannam and P.P. Yupapin, “Quantum key distribution via an optical wireless communication link for telephone networks,” Opt. Eng., 46(2007) 100502-1.

[18] M. Pfennigbauer, M. Aspelmeyer, W. Leeb, G. Baister, T. Dreischer, T. Jennewein, G. Neckamm, J. Perdigues, H.Weinfurter, and A. Zeilinger, “Satellite-based quantum communication terminal employing state-of-the-art technology,” J. Opt. Netw., 4(2005)549-560.

[19] S. Mitatha, M. Bunruangses, K. Sunat and P.P. Yupapin, Novel VANET using a Simultaneous Wireless Up-Down Link, Microwave and Optical Technology Letter, 2010. (Article in press)

[20] A. Ashkin, J.M. Dziedzic, J.E. Bjorkholm and S. Chu, “Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles,” Opt. Lett., 11, 288-290(1986).

[22] R. L. Eriksen, V. R. Daria, and J. Gl¨uckstad, “Fully dynamic multiple-beam optical tweezers,” Opt. Express. 10, 597–602 (2002).

[23] P. J. Rodrigo, V. R. Daria, and J. Gl¨uckstad, “Real-time interactive optical micromanipulation of a mixture of high- and low-index particles,” Opt. Express, 12, 1417–1425 (2004),

[24] J. Liesener, M. Reicherter, T. Haist, and H. J. Tiziani, “Multi-functional optical tweezers using computer generated holograms,” Opt. Commun. 185, 77–82 (2000).

[25] J. E. Curtis, B. A. Koss, and D. G. Grier, “Dynamic holographic optical tweezers,” Opt. Commun. 207, 169–175 (2002).

[26] W. J. Hossack, E. Theofanidou, J. Crain, K. Heggarty, and M. Birch, “High-speed holographic optical tweezers using a ferroelectric liquid crystal microdisplay,” Opt. Express 11, 2053–2059 (2003),

[27] V. Boyer, R. M. Godun, G. Smirne, D. Cassettari, C. M.Chandrashekar, A. B. Deb, Z. J. Laczik and C. J. Foot, “Dynamic manipulation of Bose-Einstein condensates with a spatial light modulator”, Phys. Rev., A 73, 031402(R) (2006).

[28] A.V. Carpentier, J. Belmonte-Beitia, H. Michinel and V.M. Perez-Garcia, “Laser tweezers for atomic solitons,” J. of Mod. Opt., 55(17), 2819–2829(2008).

[29] V. Milner, J. L. Hanssen, W. C. Campbell and M. G.Raizen, “Optical billiards for atoms, Phys. Rev. Lett., 86, 1514-1516(2001).

[300] P. T. Korda, M. B. Taylor, and D. G. Grier, “Kinetically locked-in colloidal transport in an array of optical tweezers,” Phys. Rev. Lett. 89, 128301 (2002).

[31] S. Mithata, N. Pornsuwancharoen and P.P. Yupapin, A simultaneous short wave and millimeter wave generation using a soliton pulse within a nano-waveguide, IEEE Photon. Technol. Lett., 21(13)(2009)932-934.

[32] Y. Kokubun, Y. Hatakeyama, M. Ogata, S. Suzuki, and N. Zaizen, “Fabrication technologies for vertically coupled micro ring resonator with multilevel crossing busline and ultracompact-ring radius”, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 11(2005)4–10.

[33] P.P. Yupapin and W. Suwancharoen, “Chaotic signal generation and cancellation using a microring resonator incorporating an optical add/drop multiplexer,” Opt. Commun., 280(2)(2007)343-350.

[34] P.P. Yupapin, P. Saeung and C. Li, “Characteristics of complementary ring-resonator add/drop filters modeling by using graphical approach”, Opt. Commun., 272(2007)81-86.

ภาคผนวก ก

1. Two Dimension Particle Velocity Calculation using Optical Tweezers for LMM via Optical Network , Conference Digest of CPIM 2010, March 17-21 ,Japan.

2. Novel Dynamic Optical Tweezers Array Generation using Dark Soliton Control within an Add/Drop Multiplexer, PIERS2010, March 22-26, Xian, China.