

การศึกษากาการให้กำเนิดแสงขาวโดยโซลิตอนแพลส์
ภายในวงแหวนสั่นพ้องขนาดนาโน

A PROPOSE OF WHITELIGHT GENERATION USING A SOLITON PULSE
WITHIN NANO RING RESONATOR

อาทิตย์ วรรัตน์กุล
ARTHIT WORRARUTKUL

ฉบับนี้เสนอขึ้นเป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-SC-M-090-000

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาการให้กำเนิดแสงขาวโดยโซลิตอนพัลส์
ภายในวงแหวนสั่นพ้องขนาดนาโน

A PROPOSE OF WHITELIGHT GENERATION USING A SOLITON PULSE
WITHIN NANO RING RESONATOR



อาทิตย์ วรรัตน์กุล

ARTHIT WORRARUTKUL

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 105306
วัน,เดือน,ปี..... 18 พ.ย. 2552

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-SC-M-030-036

**A PROPOSE OF WHITELIGHT GENERATION USING A SOLITON PULSE
WITHIN NANO RING RESONATOR**

ARTHIT WORRARUTKUL

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS**

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LARDKRABANG

2009

KMITL-2009-SC-M-030-036

COPYRIGHT 2009

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการให้กำเนิดแสงขาวโดยโซลิตอนพัลส์ภายในวงแหวนสั่นพร้อมขนาดนาโน
A Propose of Whitelight Generation Using a Soliton Pulse Within Nano Ring Resonator
นักศึกษา นายอาทิตย์ วรรณกุล
รหัสประจำตัว 47064104
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ปรีชา ยูพาพิน

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ฐิตินัย	แก้วแดง	
รศ.ดร.ปรีชา	ยูพาพิน	
รศ.งามนิตย์	วงษ์เจริญ	
ดร.สืบตระกูล	สุชาติ	

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 25 พฤษภาคม 2552 เวลา 13.00 น. เป็นต้นไป

สถานที่สอบ ณ อาคารจุฬาภรณ์วลัยลักษณ์ 1 ห้อง 307

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ มงคลอัสวรัตน์)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่.....๒๕.....เดือน.....พฤษภาคม.....พ.ศ.....๒๕๕๒.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาการให้กำเนิดแสงขาวโดยโซลิตอนพัลส์ภายในวงแหวน
สั้นพร้อมขนาดนาโน

นักศึกษา

นายอาทิตย์ วรรณกุล

รหัสประจำตัว

47064104

ปริญญา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

พ.ศ.

2552

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.ปรีชา ยูพาทิน

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระบบวงแหวนสั้นพร้อมขนาดเล็ก ซึ่งแถบของสัญญาณที่กว้างได้ให้กำเนิดโดยพัลส์โซลิตอนแพร่อยู่ในตัวกลางไม่เชิงเส้นทางแสง แถบของสัญญาณที่กว้างหรือความยาวคลื่นแสงสามารถสร้างขึ้นและสามารถเก็บได้ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นความสามารถของระบบสำหรับการให้กำเนิดแสงขาว ขยายกำลังแสง เก็บสัญญาณแสงและสามารถนำกลับมาให้กำเนิดแสงขาวได้อีก สัญญาณที่ถูกขยายสามารถเก็บไว้ภายในวงแหวนสั้นพร้อมนาโน และสามารถให้กำเนิดสเปกตรัมแสงที่กว้างได้อีกหลังจากที่ถูกเก็บไว้ ประโยชน์คือสำหรับพลังงานทางเลือกแสงอาทิตย์พลังงานต่ำ คือแสงขาว เข้าสู่ระบบที่ศึกษา สัญญาณแสงจะถูกขยายและเก็บไว้ในระบบซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ได้

Thesis Title	A PROPOSE OF WHITELIGHT GENERATION USING A SOLITON PULSE WITHIN NANO RING RESONATOR
Student	Mr.Arthit Worrarutkul
Student ID.	47064104
Degree	Master of Science
Program	Applied Physics
Year	2008
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr.Preecha Yupapin

ABSTRACT

We propose a new system of the nonlinear nano ring resonators, whereas the large bandwidth signal is generated by using a soliton pulse propagating within a nonlinear medium. The broad bandwidth or wavelength of light can be generated and stored. The obtained results have shown the potential of using such system for white light source generation, amplification, storage and regeneration. The amplified signals can be stored within a nano-waveguide, which is allowed to form the regeneration of the broad light spectra after storage. Alternatively, the low level solar energy, i.e. white light can be collected, then amplified and stored within the proposed system.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดีด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก รศ.ดร.ปรีชา ยูพาพิน ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. จูตินัย แก้วแดง, รศ. งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ดร. สืบตระกูล สืบชาติ ซึ่งเป็นผู้ตรวจทานเนื้อหาและให้คำแนะนำตลอดจนชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณชาวห้องแลปไฟเบอร์ออปติกทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ และบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้โอกาสในการศึกษาและทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณทุกคนในครอบครัว เพื่อนๆ นักศึกษา ผู้ร่วมงานที่คอยเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยทำวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบอบแด่ บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน

อาทิตย์ วรรณกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	5
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
1.5 วิธีดำเนินการการทำวิทยานิพนธ์	7
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 สมการแมกเวลล์ และ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Maxwell's equations and electromagnetic wave)	9
2.2 ความไม่เป็นเชิงเส้นทางแสง (Nonlinear Optic)	16
2.3 โพลาริเซชันของแสง (Polarization of light)	21
2.4 โพรงสันพ้องวงแหวนขนาดเล็ก (Micro Ring Resonator)	26
2.5 พัลส์โซลิตอน (Soliton pulse).....	30

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	31
3.1 การศึกษาโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	32
3.2 แบบจำลองการสร้างแถบสัญญาณที่กว้างโดยอาศัยโพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็ก ระดับนาโนเมตรอินพุทเป็นพัลส์โซลิตอน	37
3.3 แบบจำลองการสร้างแถบสัญญาณที่กว้าง การเก็บสัญญาณ และการให้กำเนิดแถบสัญญาณ ที่กว้างอีกครั้ง โดยอาศัยโพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็กระดับนาโนเมตรอินพุทเป็น พัลส์โซลิตอน.....	38
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	40
4.1 การสร้างแถบความยาวคลื่นแบบต่อเนื่องโดยใช้สัญญาณอินพุทเป็น โซลิตอน โดยอาศัยวงแหวน ขนาดเล็กระดับนาโนเมตร.....	40
4.2 การสร้างแถบความยาวคลื่นแบบต่อเนื่องซึ่งใช้สัญญาณอินพุทเป็น โซลิตอน โดยหน่วยเก็บ สัญญาณแสงและตัวกรองสัญญาณแอดครอปซึ่งเป็นวงแหวนขนาดเล็กระดับนาโนเมตร.....	45
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	51
5.1 สรุปผลการสร้างแถบความยาวคลื่นแบบต่อเนื่องซึ่งใช้สัญญาณอินพุทเป็น โซลิตอน โดยอาศัย วงแหวนขนาดเล็กระดับนาโนเมตร.....	51
5.2 สรุปผลการสร้างแถบความยาวคลื่นแบบต่อเนื่อง ซึ่งใช้สัญญาณอินพุทเป็น โซลิตอน โดยหน่วยเก็บ สัญญาณแสงและตัวกรองสัญญาณแอดครอปซึ่งเป็นวงแหวนขนาดเล็กระดับนาโนเมตร	52
5.3 ผลที่ได้รับจากงานวิจัย.....	53
5.4 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา.....	53

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

เอกสารอ้างอิง.....	56
ภาคผนวก.....	57
ประวัติผู้เขียน.....	62

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	
1.1.1	แควิตีแบบวงแหวนประกอบด้วยตัวกลางไดอิเล็กตริกแบบไม่เป็นเชิงเส้น ที่ศึกษาโดยอิคเคะและคคะ1
1.2	โมเดลโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงที่มีคัปเปิลอร์ใยแก้วนำแสงอันเดียว2
1.3	ไดอะแกรมโครงสร้างของโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนที่รวมในท่อนำคลื่นอันเดียว2
2.1	แสดงการหักเหของแสงจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหที่ต่างกัน14
2.2	การแพร่ของการสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าของแสง (Electromagnetic wave)15
2.3	(a) แผนผังแสดงการรวมกันของความถี่ และ (b) การแยกกันของความถี่ต้น19
2.4	โพลาริเซชันของแสงผ่านตัวกรองแสงที่บังคับการสั่นให้เหลือทิศทางเดียว22
2.5	องค์ประกอบของโพลาริเซชัน22
2.6	รูปแบบการสั่นของสนามไฟฟ้าในกรณีที่ $\phi = 0$ และ $\phi = \pi$25
2.7	รูปแบบการสั่นของสนามไฟฟ้าในกรณีที่ $\phi = \frac{\pi}{2}$ และ $\phi = \frac{3\pi}{2}$25
2.8	รูปแบบการสั่นของสนามไฟฟ้าในกรณีที่ $\phi \neq 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$26
2.9	โพรงสั้นพ้องวงแหวนวงเดียว27
2.10	แสดงโพรงสั้นพ้องวงแหวนแอดครอป.....29
2.11	แสดงลักษณะของโซลิตอนพัลส์ตามระยะทาง.....31
3.1	โมเดลโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนท่อนำคลื่นที่ประกอบด้วยคัปเปิลอร์32
3.2	แผนผังการสร้างแถบสัญญาณที่กว้าง โดยอาศัยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนนาโนเมตร37
3.3	แผนผังการสร้างแถบสัญญาณที่กว้าง การเก็บสัญญาณ การให้กำเนิดแถบสัญญาณที่กว้างได้ใหม่ โดยอาศัยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนนาโนเมตร39
4.1	แบบจำลองการกรองของโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กเมื่ออินพุตเป็นโซลิตอนสำหรับ โพรงสั้นพ้องระดับนาโนเมตร.....40

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 แสดงสัญญาณเคออส เมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก ที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี R_1 , R_2 และ R_3 คือ 10, 7 และ 5 ไมครอน ค่าคัปปลิง κ_1 , κ_2 , κ_3 เป็น 0.1, 0.05 และ 0.05.....	41
4.3 แสดงสัญญาณเคออส เมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก ที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี R_1 , R_2 และ R_3 คือ 10, 7 และ 5 ไมครอน ค่าคัปปลิง κ_1 , κ_2 , κ_3 เป็น 0.1, 0.05 และ 0.05.....	43
4.4 แบบจำลองการกรองของโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กเมื่ออินพุตเป็น โซลิตอน สำหรับโพรงสั้นพ้องระดับนาโนเมตร.....	45
4.5 รูปแสดงการเกิดแถบสัญญาณที่กว้าง เมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวน ขนาดเล็กที่ต่อ แบบอนุกรมกันมีรัศมี R_1 , R_2 และ R_3 คือ 10, 7 และ 5 μm ค่าคัปปลิง κ_1 , κ_2 , κ_3 เป็น 0.9, 0.9 และ 0.9 หน่วยเก็บสัญญาณแสงรัศมี R_4 คือ 4 μm ค่าคัปปลิง κ_{4s} , κ_{4s1} , κ_{4s2} เป็น 0.4, 0.9 และ 0.5 R_5 เป็น 20 μm ค่าคัปปลิง κ_5 เป็น 0.9 โพรงสั้นพ้อง แบบวงแหวนขนาดเล็ก แอดดรอป รัศมี R_4 เป็น 20 μm ค่าคัปปลิง κ_1 , κ_2 เป็น 0.1, 0.1.....	46
4.6 รูปแสดงการเกิดแถบสัญญาณที่กว้าง เมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวน ขนาดเล็ก ที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี R_1 , R_2 และ R_3 คือ 10, 7 และ 5 μm ค่าคัปปลิง κ_1 , κ_2 , κ_3 เป็น 0.95, 0.9 และ 0.9 หน่วยเก็บสัญญาณแสงรัศมี R_4 คือ 5 μm ค่าคัปปลิง κ_{4s} , κ_{4s1} , κ_{4s2} เป็น 0.5, 0.9 และ 0.5 R_5 เป็น 20 μm ค่าคัปปลิง κ_5 เป็น 0.9 โพรงสั้นพ้อง แบบวงแหวนขนาดเล็ก แอดดรอป รัศมี R_4 เป็น 20 μm ค่าคัปปลิง κ_1 , κ_2 เป็น 0.1, 0.1.....	48

บทที่ 1

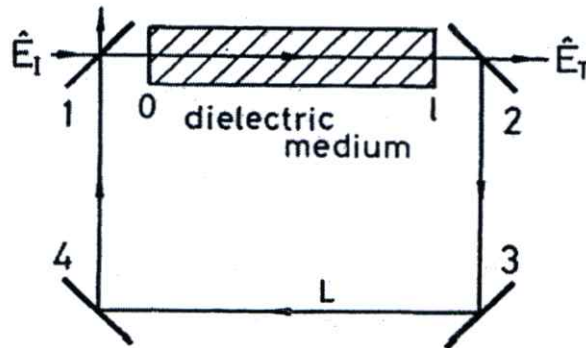
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

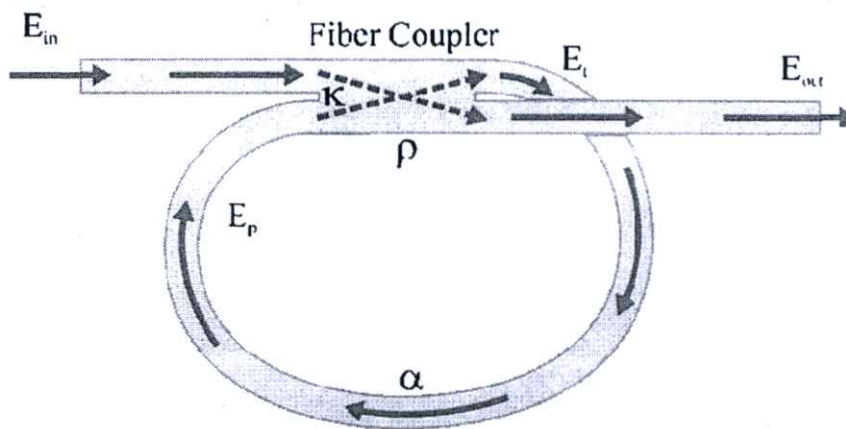
นับตั้งแต่ประมาณปี ค.ศ. 1978 จนถึงปัจจุบัน ได้มีงานวิจัยมากมายเกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์-แบบไม่เป็นเชิงเส้นทางแสง โพรงสั้นพ้องแบบวงแหวน-ใยแก้วนำแสง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นทางแสง เช่น เคออส ที่เกิดขึ้นในโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวน

จากการศึกษาพบว่า มีงานวิจัยที่น่าสนใจเกี่ยวกับงานวิจัย ทั้งทางทฤษฎีและการทดลองเกี่ยวกับปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนโดยอาศัยตัวกลางแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยเริ่มจาก

ในปี ค.ศ. 1980 อิเคดะและคณะ (Ikeda *et al.*) ได้ศึกษาพฤติกรรมเคออสของการส่งผ่านแสงจากแควิตีแบบวงแหวน (ring cavity) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 โดยใช้ตัวกลางไดอิเล็กตริกแบบไม่เป็นเชิงเส้นภายใต้การเปลี่ยนแปลงจากสถานะคงที่ (stationary state) ไปเป็นสถานะแบบคาบ (periodic state) และไปเป็นสถานะแบบไม่เป็นคาบ (nonperiodic state) เมื่อความเข้มแสงที่ตกกระทบบมีความเข้มแสงเพิ่มขึ้นและเป็นครั้งแรกที่ได้ค้นพบลักษณะเคออสที่เกิดขึ้นจากการวนลูบของสนามไฟฟ้าภายในแควิตีแบบวงแหวน



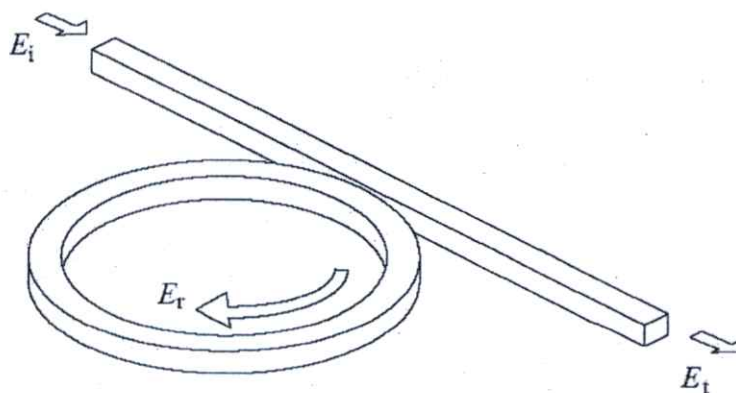
รูปที่ 1.1 แควิตีแบบวงแหวนประกอบด้วยตัวกลางไดอิเล็กตริกแบบไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 1.2 โมเดลโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงที่มีคัปเปิลอร์ใยแก้วนำแสงอันเดียว

เนื่องจากในระบบการสื่อสารเชิงแสงพบว่า (Optical communication) จะเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงทางเส้นเกิดขึ้น เช่น เคออส แสง ซึ่งปรากฏการณ์ที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในระบบการสื่อสารและการประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆ จึงพยายามหาวิธีการป้องกันและควบคุม ยกเว้นเฉพาะกรณีไบสเดบิลิตีทางแสงที่มีประโยชน์ เช่น ใช้เป็นสวิตซ์เชิงแสง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์เป็นการศึกษาปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กเพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณใหม่ สำหรับความไม่เป็นเชิงเส้นภายในโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก

โพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนเป็นลักษณะที่นำคลื่นง่ายๆที่เป็น โครงสร้างแบบวงแหวน ดังแสดงในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 ไดอะแกรมโครงสร้างของโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนที่รวมในท่อนำคลื่นอันเดียว

เมื่อสนามไฟฟ้าอินพุต E_i ถูกส่งเข้าไปในท่อนำคลื่นแบบวงแหวนตลอดการเดินทางภายในท่อนำคลื่นทำให้เกิดการย้อนกลับเชิงแสงและสนามภายในโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวน E_r จะเริ่มเกิดขึ้นการคับปลิงกันระหว่างท่อนำคลื่นในส่วนที่เป็นเส้นตรงและวงแหวน จะทำให้คลื่นที่เกิดขึ้นเลือนหายไปโดยเร็ว เพราะช่องห่าง (Gap) และความยาวของการคับปลิงระหว่างท่อนำคลื่นจะกำหนดการรวมกำลังแสงจากท่อนำคลื่นที่เป็นส่วนเส้นตรงไปยังท่อนำคลื่นที่เป็นวงแหวน คุณสมบัติเชิงกลของการย้อนกลับทางแสงเกิดขึ้นอย่างง่าย ๆ โดยส่วนของท่อนำคลื่นแบบวงแหวนทำให้เกิดความยาวคลื่นที่แน่นอนที่จะทำให้เกิดการสั้นพ้องภายในท่อนำคลื่นแบบวงแหวนที่เป็นการเลือกค่าความถี่ โหมดการสั้นพ้องจะสอดคล้องกับค่าความยาวคลื่นดังนี้

$$m\lambda_m = nL \quad (1.1)$$

เมื่อ m คือ จำนวนโหมดตามยาวและเป็นจำนวนเต็ม

λ_m คือ ความยาวคลื่นของโหมดการสั้นพ้อง

n คือ ดัชนีหักเหของวัสดุที่ใช้ทำท่อนำคลื่น

และ L คือ ความยาวของโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวน

สนามไฟฟ้าที่วนรอบภายในโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวน กำหนดโดย

$$E_r(t) = -ikE_i(t) + rae^{i\phi} E_r(t - \tau) \quad (1.2)$$

เมื่อ k คือ สัมประสิทธิ์การคับปลิงสนามระหว่างท่อนำคลื่นส่วนที่เป็นเส้นตรงและวงแหวน

r คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านสนามระหว่างท่อนำคลื่นส่วนที่เป็นเส้นตรงและวงแหวน

ดังนั้น $\kappa^2 + r^2 = 1$ และ $a = e^{-\alpha_0 L/2}$ คือสนามการส่งผ่านของการวนรอบ (Round trip field transmission) เมื่อ α_0 เป็นการสูญเสียของคลื่นที่เดินทางภายในวงแหวนและ τ คือเวลาการวนรอบภายใน โพรงสั้นพ้องแบบวงแหวน เฟสการวนรอบในโพรงสั้นพ้อง ϕ กำหนดโดย

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} nL \quad (1.3)$$

สนามการส่งผ่านที่เอาท์พุทของท่อนำคลื่นในส่วนที่เป็นเส้นตรง E_t เป็นการกำหนดโดย

$$E_t(t) = rE_i(t) - i\kappa a e^{i\phi} E_r(t - \tau) \quad (1.4)$$

ที่สถานะคงที่ฟังก์ชันทรานสเฟอร์ของการส่งผ่านในโพรงสั้นพ้องสามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{E_t}{E_i} = \frac{r - a e^{i\phi}}{1 - r a e^{i\phi}} \quad (1.5)$$

สนามที่เดินทางภายในแควิตีแบบวง-แหวนจะเป็นคลื่นที่เคลื่อนที่ (traveling wave) จากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับปรากฏการณ์ ความไม่เป็นเชิงเส้นภายในโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กแสดง เคออส เมื่อ $n_2 = 2.8 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ ที่เป็นผลจาก n_2 ที่เป็นผลจากดัชนีของแสงที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามกำลังของอินพุตแสง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนเพื่อใช้แสดงคุณลักษณะการสร้างแถบสัญญาณที่กว้าง โดยใช้โพรงสั่นพ้องวงแหวนขนาดเล็ก สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนเพื่อใช้แสดงคุณลักษณะการสร้างแถบสัญญาณที่กว้างโดยวงแหวน 1 วง และที่เชื่อมต่อนุกรมกัน 2 , 3 วง ตามลำดับ
- 2) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนเพื่อใช้แสดงคุณลักษณะการสร้างแถบสัญญาณที่กว้าง โดยใช้โพรงสั่นพ้องวงแหวนขนาดเล็ก สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนเพื่อใช้แสดงคุณลักษณะการสร้างแถบสัญญาณที่กว้างโดยวงแหวน 1 วง ที่เชื่อมต่อนุกรมกัน 2 , 3 วง ตามลำดับ และต่อกับโพรงสั่นพ้องวงแหวนขนาดเล็ก อีก 3วงเพื่อใช้ ขยายกำลังแสง เก็บสัญญาณแสง และ นำสัญญาณแสงที่เก็บไว้กลับมาให้กำเนิดแถบสัญญาณที่กว้างได้ใหม่ โดยวงแหวนสั่นพ้องขนาดนาโน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยเริ่มต้นด้วยการสร้างโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นเพื่อหาลักษณะที่เหมาะสมของโครงสร้าง เช่น อัตราการแบ่งกำลังแสงของคัป-เพลอร์ดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ขึ้นกับกำลังแสงอินพุต ความยาวของวงแหวนที่ใช้ ความยาวคลื่นของแสงอินพุต การเปลี่ยนเฟสแบบไม่เป็นเชิงเส้น ทั้งยังทำการศึกษาคูณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางแสง ของวงแหวนสั่นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก เรียก InGaAsP/InP นำมาต่อแบบอนุกรมโดยให้มีขนาดรัศมีของวงแหวนเล็กลงจากไมโครเป็นนาโนเมตรและศึกษาว่าผลกระทบใดบ้างที่มีผลทำให้เกิดความไม่เป็นเชิงเส้นในเนื้อสารความสัมพันธ์ของขนาดวงแหวนกับสัญญาณที่ออกมา รวมไปถึงขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่นที่มีผลกระทบต่อสัญญาณที่สัมพันธ์กับกำลังของแสงที่ให้กับ วงแหวนสั่นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก ผลที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นคือเป็นผลที่ได้จาก เชิงเส้น (linear) , ลำดับที่ 2(second-order) , ลำดับที่ 3(third-order) และ ลำดับที่อื่นๆ (other-order) ที่รวมกันอยู่มากมาย โดยสัญญาณที่ให้ออกมาจากวงแหวนผสมกันอยู่มากมาย โดยในงานวิจัยต้องการทำการศึกษาวงแหวนสั่นพ้องขนาดเล็ก โดยสัญญาณที่ให้อยู่ในรูปของ พัลส์โซลิตอน (Soliton pulse) ที่ให้กับโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กซึ่งความยาวคลื่นที่ใช้ทำการศึกษาคือ 1550 nm เพื่อทำการสร้างแบบจำลองของการสร้างแถบสัญญาณที่กว้าง จากความยาวคลื่นที่

กำหนดให้ในข้างต้น ทำการออกแบบวงแหวนเพื่อทำการกรอง ในแต่แบบ วงแหวนในการออกแบบทั้งแบบ 1 วงและนำมาต่อกันยาวเป็น 2, 3 ตามลำดับ เพื่อให้ได้แถบสัญญาณที่กว้าง และมีความกว้างของความยาวคลื่นที่แคบ หรือกรองสัญญาณให้เหลือเฉพาะสัญญาณที่ต้องการได้โดยอาศัยการเปลี่ยนขนาดของโพรงสั้น พ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก หรือ การเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์ของแสงที่ให้เข้าไปในวงแหวน ในการเปลี่ยนค่าต่างๆ เพื่อให้ได้สัญญาณที่ต้องการวงแหวน สุดท้าย สามารถกรองความยาวคลื่นค่าใดก็ได้จากการออกแบบโดยใช้ วงแหวนขนาดเล็กในการออกแบบ อาศัย ปรากฏการณ์ของเคอร์ (Kerr effect) และ คุณสมบัติของโซลิตอน เพื่อทำให้เกิดการเสริมกันขึ้นเป็นความยาวคลื่นแบบต่อเนื่องได้ อาจรวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัด (Effective Area, A_{eff}) ของท่อนำคลื่น เพื่อให้สัญญาณที่ได้มีความเข้มมากขึ้น สัญญาณที่ได้สามารถเก็บไว้ภายในหน่วยเก็บสัญญาณวงแหวนสั้นพ้องขนาดนาโน โดยการออกแบบ และสามารถนำสัญญาณที่เก็บไว้กลับมาสร้างแถบสัญญาณที่กว้างได้อีก โดยต่อกับวงแหวนสั้นพ้องขนาดเล็กแอดดรอปประโยชน์ที่ได้จากการศึกษา สามารถเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ไว้ในระบบวงแหวนสั้นพ้องขนาดเล็กโดยสามารถนำแสงที่เก็บไว้กลับมาให้กำเนิดพลังงานแสงได้อีกซึ่งนำไปเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เข้าใจการประยุกต์ใช้วงแหวนสั้นพ้องขนาดเล็กเพื่อใช้สร้างแถบสัญญาณที่กว้าง ขยายกำลังแสง เก็บสัญญาณแสง และนำสัญญาณที่เก็บไว้ให้กำเนิดแถบกว้างของสัญญาณได้อีก ได้โดยใช่วงแหวนสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กได้
- 2) ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ กำหนดคุณลักษณะการสร้างแถบสัญญาณที่กว้างขยายกำลังแสง เก็บสัญญาณแสง และให้กำเนิดแถบกว้างสัญญาณได้อีก
- 3) สามารถกำหนดคุณลักษณะ การสร้างแถบสัญญาณที่กว้าง ขยายกำลังแสง เก็บสัญญาณแสง และนำสัญญาณแสงที่เก็บไว้กลับมาให้กำเนิดแถบสัญญาณที่กว้างได้ใหม่ โดยวงแหวนสั้นพ้องได้ตามต้องการ
- 4) สามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้ในการออกแบบและสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้งานได้จริง
- 5) สามารถออกแบบวงแหวนในการสร้างแถบสัญญาณที่กว้าง ขยายกำลังแสง เก็บสัญญาณแสง นำสัญญาณแสงที่เก็บไว้กลับมาให้กำเนิดแถบสัญญาณที่กว้างได้ใหม่ โดยพัลส์โซลิตอน

1.5 วิธีดำเนินการการทำวิทยานิพนธ์

สำหรับแผนการดำเนินการแบ่งเป็น ขั้นตอนต่างๆดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาหลักการพื้นฐานทางแสงของโพรงสั่นพ้องวงแหวน

ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางแสงในสารที่ใช้ออกแบบโพรงสั่นพ้องวงแหวน

ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาคุณสมบัติของ พัลส์โซลิตอน (Soliton pulse)

ขั้นตอนที่ 4 ศึกษาการประดิษฐ์ โพรงสั่นพ้องวงแหวน ระดับไมโครเมตร ที่ใช้สร้างแถบสัญญาณที่กว้าง ด้วยระบบวัสดุสารกึ่งตัวนำ

ขั้นตอนที่ 5 ศึกษาบทความ ที่มีการประยุกต์ใช้โพรงสั่นพ้องวงแหวน ระดับไมโครเมตร เป็นตัวกรองสัญญาณแสง การส่งผ่านแสงในโพรงสั่นพ้อง การวิเคราะห์สเปกตรัมการส่งผ่านของ ตัวกรองโพรงสั่นพ้องวงแหวนที่ต่อกัน

ขั้นตอนที่ 6 ออกแบบโครงร่างตัวกรองโพรงสั่นพ้องวงแหวน 1 วงและที่ต่ออันดับกัน 2 , 3 วง หาความสัมพันธ์ฟังก์ชันถ่ายโอนทั้งในรูปสนามไฟฟ้าและความเข้มสนามไฟฟ้า ในขั้นตอนมีการต่อวงแหวน 1 วงสำหรับเก็บสัญญาณ และอีก1วงเพื่อให้กำเนิดแถบสัญญาณที่กว้างได้

ขั้นตอนที่ 7 จำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของโพรงสั่นพ้องวงแหวนที่ได้ในขั้นตอนที่ 5 และประมวลผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เปรียบเทียบผลที่ได้ในเรื่องเดียวกันกับบทความระดับนานาชาติ ถ้ามีข้อบกพร่องทำการปรับปรุงแก้ไข

ขั้นตอนที่ 8 จำลองแบบโดยให้สัญญาณเป็น พัลส์โซลิตอน (Soliton pulse) ให้กับโพรงสั่นพ้องวงแหวนขนาดเล็กเพื่อให้ได้ค่าสำหรับสร้างแถบสัญญาณที่กว้าง

ขั้นตอนที่ 9 วิเคราะห์ผลที่ได้ในรูปแบบของ พัลส์โซลิตอน (Soliton pulse) เพื่อนำไปใช้ในการสำหรับสร้างแถบสัญญาณที่กว้าง

ขั้นตอนที่ 10 จำลองแบบโดยโพรงสั่นพ้องวงแหวนขนาดเล็กเพื่อให้ได้ค่าสำหรับสร้างแถบสัญญาณที่กว้าง เก็บสัญญาณแสง และ นำสัญญาณแสงที่เก็บไว้กลับมาให้กำเนิดแถบสัญญาณที่กว้างได้ใหม่

ขั้นตอนที่ 11 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการเก็บสัญญาณแสงเพื่อนำไปใช้ในการให้กำเนิดแถบสัญญาณที่กว้าง

ขั้นตอนที่ 12 สรุปการทำวิทยานิพนธ์และแนวทางในการพัฒนาต่อไป

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย คือ การศึกษาทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การเดินทางของแสงในเนื้อสาร ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดความไม่เป็นเชิงเส้นเกิดขึ้นจากคุณสมบัติดังกล่าว เป็นผลของหลายลำดับ (other-order)

2.1 สมการแมกเวลล์และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Maxwell's equations and electromagnetic wave)

จากศึกษาทราบว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายคือในแบบของสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations) [22]

สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic fields)

ในส่วนของสมการแมกซ์เวลล์จะมีส่วนประกอบสองส่วนคือ

1. สนามไฟฟ้า (Electric field , E)
2. สนามแม่เหล็ก (Magnetic field , B)

โดยค่าของสนามทั้งสองค่านั้นสามารถเขียนใหม่ได้เป็น การเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้า (Electric Displacement , D) และ ปริมาณของสนามแม่เหล็ก (Equivalent magnetic quantity , H) โดยแนวคิดสำหรับการเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในสาร การเดินทางของสนามไฟฟ้าในสารที่เป็นฉนวน (Dielectric) การเคลื่อนที่เป็นอิเล็กตริกโพลาริเซชัน (Electric Polarization , P) โดยมีลักษณะเป็น คู่ของขั้วไฟฟ้า (Electric dipole moment) สามารถเขียน การเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้า แทนด้วย สนามไฟฟ้า (Electric field , E) กับ อิเล็กตริกโพลาริเซชัน (Electric Polarization , P) ได้เป็น

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (2.1)$$

สำหรับการโพลาริเซชันในสารสามารถประยุกต์รูปแบบใหม่ได้เป็น

$$P = \epsilon_0 \chi E \quad (2.2)$$

โดยที่

ϵ_0 คือ การแพร่ของไฟฟ้า (Electric permittivity) สำหรับในสุญญากาศ ($8.854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$)

χ คือ ความอ่อนไหวทางไฟฟ้า (Electric susceptibility) สำหรับในเนื้อสาร

เขียนใหม่สำหรับสมการเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าใหม่เป็น

$$D = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad (2.3)$$

เมื่อแทนด้วย ϵ_r

$$\epsilon_r = 1 - \chi \quad (2.4)$$

โดยที่

ϵ_r คือ ความสัมพันธ์ในการแพร่ทางไฟฟ้า (Relative electric permittivity) สำหรับในเนื้อสารส่วนที่เป็นสนามแม่เหล็กเขียนได้เป็น

$$H = \frac{1}{\mu_0} B - M \quad (2.5)$$

โดยที่

μ_0 คือ การแพร่ของแม่เหล็ก (Magnetic permeability) ในสุญญากาศ ($4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$)

M คือ ความเป็นแม่เหล็ก (Magnetization) ในเนื้อสาร

สามารถที่จะเขียนการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กในรูปแบบเดียวกันกับสนามไฟฟ้าได้เป็น

$$M = \chi_M H \quad (2.6)$$

โดยที่

χ_M คือ ความอ่อนไหวทางแม่เหล็ก (Magnetic susceptibility) สำหรับในเนื้อสาร

จากสมการที่ 2.5 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} B &= \mu_0 (H + M) \\ &= \mu_0 (1 + \chi_M) H \\ &= \mu_0 \mu_r H \end{aligned} \quad (2.7)$$

โดยที่

$\mu_r = 1 + \chi_M$ คือ ความสัมพันธ์ในการแพร่ทางแม่เหล็ก (Relative magnetic permeability) สำหรับในเนื้อสาร

สำหรับในสุญญากาศ $\chi_M = 0$ จะได้ว่า

$$B = \mu_0 H \quad (2.8)$$

โดยในทางแสงแล้วการเปลี่ยนแปลง คู่สนามแม่เหล็ก (Magnetic dipole) ของ magnetic susceptibility ที่ตอบสนองกับเนื้อสารน้อยมากทำให้ได้ $\mu_r = 1$ สมการของสนามแม่เหล็กของนอกและในเนื้อสารจะมีค่าไม่ต่างกันสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ 2.8

สมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations)

จากสนามไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กของ เจมส์ แมกซ์เวลล์ (James Maxwell) ได้ทำการสรุปการเคลื่อนที่ที่เกิดจากการไหลของกระแสกับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้สมการแมกซ์เวลล์ เป็นสมการที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าสำหรับสมการแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (2.9)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.10)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.11)$$

$$\nabla \times H = j + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.12)$$

โดยที่

ρ คือ ค่าความหนาแน่นของประจุ (the free charge density)

j คือ ค่าความหนาแน่นของกระแส (the free current density)

จากการศึกษาทำให้ทราบว่า 2 ข้อแรกเป็นสมการสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กที่อยู่กับที่ ซึ่งมีที่มาจากสมการของกฎของเกาส์ (Gauss's law) โดยสนามไฟฟ้าเป็นแนวคิดการสร้างผิวปิดครอบสนามไฟฟ้าซึ่งจะทำให้ได้ค่าของความหนาแน่นที่อยู่ภายในผิวปิด ส่วนสนามแม่เหล็กก็เช่นกันแต่จะได้ว่าเท่ากับศูนย์ด้วยแนวคิดที่ว่าเส้นแรงแม่เหล็กเข้าต้องเท่ากับออกจึงทำให้ได้ศูนย์ กฎข้อ 3 เป็นการรวมสมการความสัมพันธ์ของ ฟาราเดย์ (Faraday) และ เลนซ์ (Lenz) ที่ เป็นความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า โดยที่การเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามไฟฟ้าได้ และกฎข้อสุดท้ายมาจากกฎของแอมแปร์ (Ampere's law) จากความสัมพันธ์ของการไหลของกระแส และการเคลื่อนที่ของประจุทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave)

จากสมการแมกเวลล์ ที่ผ่านมาสามารถนำมาอธิบาย คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) จากสมการที่ 1 และ 4 ของ Maxwell's equation โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะได้ว่า ไม่มีประจุผิวปิด ($\rho = 0$) และ ไม่มีกระแสไหลผ่าน ($j = 0$) ทำการพิจารณาสมการที่ 4 โดยใช้ความสัมพันธ์ D กับ E จากสมการที่ 2.3 และ H กับ B จากสมการที่ 2.8 แทนค่าให้อยู่ในรูปแบบใหม่ได้ว่า

$$\frac{1}{\mu_0} \nabla \times B = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.13)$$

จากสมการที่ 2.11 สามารถแทน $\nabla \times B$ ในสมการที่ 2.13 ได้เป็น

$$\nabla \times (\nabla \times E) = -\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (2.14)$$

ใช้หลักของเวกเตอร์ (Vector Identity) คือ

$$\nabla \times (\nabla \times E) = \nabla (\nabla \cdot E) - \nabla^2 E \quad (2.15)$$

จากที่กล่าวมาแล้วว่า $\nabla \cdot E = 0$ จากสมการที่ 2.9 เมื่อ $\rho = 0$ และ D สามารถเป็นสมการสรุปคือ

$$\nabla^2 E = \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (2.16)$$

สมการที่ 2.16 สามารถหาค่าของความเร็วสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่เป็น v

$$\frac{1}{v^2} = \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r \quad (2.17)$$

ในสุญญากาศ $\epsilon_r = 1$ ความเร็วของการเคลื่อนที่คือ c ที่รู้จักกันดีในรูปแบบของความเร็วแสงในสุญญากาศ

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 2.998 \times 10^8 \text{ ms}^{-1} \quad (2.18)$$

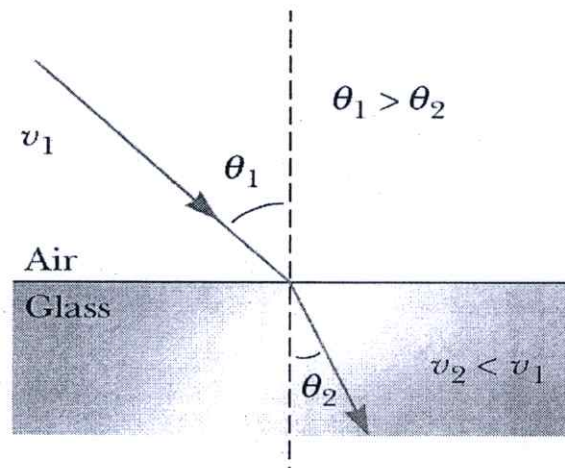
จากความสัมพันธ์ ทำให้ได้ค่าความต่างของความเร็วของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศ และ ความเร็วของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางใดๆ เป็น

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} c \equiv \frac{c}{n} \quad (2.19)$$

โดยที่ n คือ ค่าของดัชนีหักเหของแสง (refractive index)

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (2.20)$$

โดยค่าของดัชนีหักเหของแสง ความสำคัญกับการเคลื่อนที่ของแสงในเนื้อของสารใดๆ



รูปที่ 2.1 แสดงการหักเหของแสงจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหที่ต่างกัน

จากสมการแมกซ์เวลล์ เป็นสมการการเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก หรือ ที่รู้จักกันในรูปแบบของแสงที่เป็นรูปแบบหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกมาจากดวงอาทิตย์ จากแนวคิดที่ว่า ω คือ ความเร็วเชิงมุมของการแพร่ไปของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และ เพื่อง่ายในการพิจารณา กำหนดให้การเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในแกนอ้างอิงของทิศทาง Z โดยจะได้สมการความสัมพันธ์การแพร่ของสนามแม่เหล็ก และ สนามไฟฟ้าในระนาบของ X กับ Y กำหนดให้การแพร่ของสนามไฟฟ้ามีเฉพาะในแกน X ทำให้ได้ว่า $E_y = E_z = 0$ และกำหนดให้การแพร่ของสนามแม่เหล็กมีเฉพาะในแกน Y ทำให้ได้ว่า $B_x = B_z = 0$ จากสมการแมกซ์เวลล์ สมการที่ 2.11 และ 2.13 ถูกเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{\partial E_x}{\partial E_z} = -\frac{\partial B_y}{\partial t}$$

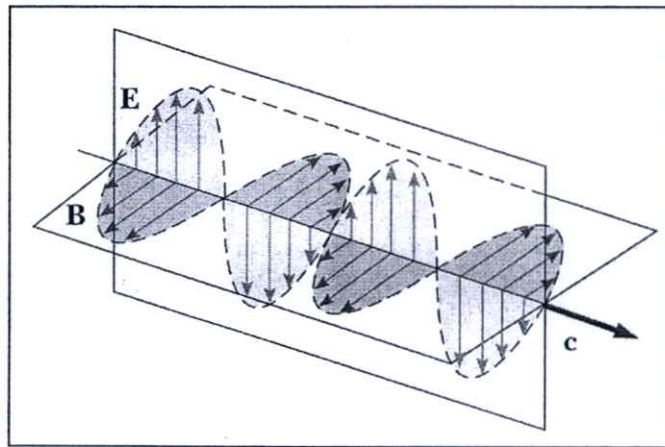
$$-\frac{\partial B_y}{\partial z} = \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial E_x}{\partial t}$$
(2.21)

จากสมการข้างต้นนี้ สามารถหาผลเฉลยของสมการคำตอบของอนุพันธ์ได้ว่า

$$E_x(z, t) = E_{x0} \cos(kz - \omega t + \phi)$$

$$B_y(z, t) = B_{y0} \cos(kz - \omega t + \phi)$$
(2.22)

โดยสามารถเขียนการแพร่ของการสนามแม่เหล็ก และ สนามไฟฟ้า ของแสงได้เป็นดังนี้



รูปที่ 2.2 การแพร่ของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าของแสง (Electromagnetic wave)

โดยที่

E_{x0} คือ ความสูงของคลื่นสูงสุด (amplitude)

ϕ คือ มุมต่างทางแสง (optical phase)

k คือ เวกเตอร์คลื่น (wave vector)

โดยที่ k คือ $k = \frac{2\pi}{\lambda_m} = \frac{\omega}{v} = \frac{n\omega}{c}$ เมื่อ λ_m คือ ค่าของความคลื่นที่เข้าไปในเนื้อสาร

2.2 ความไม่เป็นเชิงเส้นทางแสง (Nonlinear Optic)

จากการที่มีสนามจากภายนอกไปในเนื้อสารทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง สนามภายในโดยการตอบสนอง กับลักษณะสนามไฟฟ้าของโพลาริเซชันสัญญาณแสง โดยเป็นจะส่งผลกับสนามไฟฟ้าที่อิเล็กตรอนสร้างขึ้น สนามมีลักษณะเป็นสองขั้วไฟฟ้า (Dipole) แพร่ออกมาในรูปของสนามไฟฟ้า โดยสามารถเขียนสมการในการอธิบายให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงไม่เป็นเชิงเส้นทางแสง (Nonlinear Optic) [20 , 21 , 22] โดยจะมีทั้งค่าที่เป็นเชิงเส้น และ ความไม่เป็นเชิงเส้นของแสง ที่ให้กับเนื้อสารที่เป็นฉนวน (Dielectric) โดยสมการที่มาจากกรณีของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสมการแมกซ์เวลล์ เขียนได้เป็น

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = -\mu_0 \frac{\partial^2 P(E)}{\partial t^2} \quad (2.23)$$

โดยจาก สมการที่ 2.2 ที่ว่า $P = \epsilon_0 \chi E$ เมื่อทำการกระจายได้ดังนี้

$$P = \epsilon_0 \chi^{(1)} E + \epsilon_0 \chi^{(2)} E^2 + \epsilon_0 \chi^{(3)} E^3 + \dots + \epsilon_0 \chi^{(n)} E^n \quad (2.24)$$

โดยที่

χ คือ สภาพความอ่อนไหวทางไฟฟ้า (Electric Susceptibility) ที่อยู่ในรูปของเมตริกซ์เทนเซอร์ (Matrix tensor) จากการศึกษาทำให้เขียนใหม่เพื่อให้ง่าย ในรูปแบบของ โพลาริเซชัน แทนด้วย

$$\begin{aligned} P^{(1)} &= \epsilon_0 \chi^{(1)} E \\ P^{(2)} &= \epsilon_0 \chi^{(2)} E^2 \\ P^{(3)} &= \epsilon_0 \chi^{(3)} E^3 \\ &\vdots \\ P^{(n)} &= \epsilon_0 \chi^{(n)} E^n \end{aligned} \quad (2.25)$$

แทนเข้าไปในสมการที่ 2.24 ในรูปของ โพลาริเซชัน และ อธิบายความหมายของแต่ละเทอมอย่างไร

$$P = P_L^{(1)} + P_{NL}^{(2)} + P_{NL}^{(3)} + \dots + P_{NL}^{(n)} \quad (2.26)$$

จากสมการข้างต้นสามารถอธิบายได้ว่า $\chi^{(n)}$ เป็น เทอมที่เป็นเชิงเส้น และ เทอมที่ไม่เป็นเชิงเส้น ของ สภาพความอ่อนไหวทางไฟฟ้า โดยมีเทอมที่เป็นเชิงเส้นคือ $\chi^{(1)}$ หรือ $P_L^{(1)}$ ที่ค่าความเป็นเชิงเส้นของโพลาริเซชัน ส่วนเทอมที่ $P_{NL}^{(2)}$ และ $P_{NL}^{(3)}$ ถูกเรียกว่า ลำดับที่ 2 (second order) และ ลำดับที่ 3 (third order) [7] ตามลำดับ โดยเป็นเทอมความไม่เป็นเชิงเส้นของโพลาริเซชัน จากแนวคิดในเทอมของลำดับที่ 2 และ 3 เป็นผลจากกำลังของสนามที่สูง เข้าไปทำให้เกิดการสั่นของสนาม ที่ให้เข้าไปทำให้เกิดความถี่ใหม่ขึ้นมาทำให้ความถี่ที่ออกมาที่มีความถี่เปลี่ยนไปจากความถี่เดิมที่ให้เข้าไปเป็น 2ω หรือ 3ω เป็นต้น

โพลาริเซชันเชิงเส้น (Linear Polarization)

จากสภาพความอ่อนไหวทางไฟฟ้าในแต่ละเทอม สามารถเขียนในรูปของเมตริกซ์เทนเซอร์ (Matrix tensor) โดยในเนื้อสารจริงค่าของสภาพความอ่อนไหวทางไฟฟ้าเป็น $\chi^{(n)}$ พิจารณาในเทอมโพลาริเซชันเชิงเส้น (Linear polarization)

$$P^{(1)}(\omega) = \epsilon_0 \chi^{(1)}(\omega) E(\omega) \tag{2.27}$$

โดยค่าของความถี่ของสนามที่ให้เข้าไปไม่มีสนามภายในลบกวน สนามที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงไม่มี โดยเทอมจะได้ว่าไม่มีการสร้างความถี่ใหม่ขึ้นมา โดยสามารถเขียนในรูปของเมตริกซ์เทนเซอร์ สำหรับสภาพความอ่อนไหวทางไฟฟ้าที่ $\chi^{(1)}$ ซึ่งมีแกนการกระทำต่อกันเพียงในแกนสนามอ้างอิงสามแกนคือ x, y และ z โดยเป็นการกระทำของสนามที่ให้เข้าไป เมื่อมีเฉพาะสนามที่ให้เข้าไป เวกเตอร์ที่เข้าไปเป็น $3^2 = 9$ เทอมสำหรับสภาพความอ่อนไหวทางไฟฟ้าที่ $\chi^{(1)}$ ที่เป็น เมตริกซ์ 3x3 เขียนสมการได้เป็น

$$\begin{bmatrix} P_{Lx}(\omega) \\ P_{Ly}(\omega) \\ P_{Lz}(\omega) \end{bmatrix} = \epsilon_0 \begin{bmatrix} \chi_{xx}^{(1)}(\omega) & \chi_{xy}^{(1)}(\omega) & \chi_{xz}^{(1)}(\omega) \\ \chi_{yx}^{(1)}(\omega) & \chi_{yy}^{(1)}(\omega) & \chi_{yz}^{(1)}(\omega) \\ \chi_{zx}^{(1)}(\omega) & \chi_{zy}^{(1)}(\omega) & \chi_{zz}^{(1)}(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x(\omega) \\ E_y(\omega) \\ E_z(\omega) \end{bmatrix} \tag{2.28}$$

จากสมการที่ 2.28 เขียนให้อยู่ในรูปที่ลดรูปได้เป็น

$$P_{Li}(\omega) = \epsilon_0 \sum_j \chi_{ij}^{(1)} E_j(\omega) \tag{2.29}$$

เมื่อกำหนดให้ $i, j = x, y, z$

ฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 ของโพลาริซ (Second Order polarized)

ในกรณีของความไม่เป็นเชิงเส้นของโพลาริเซชันสำหรับฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 (Second order หรือ Second harmonic) โดยในที่ทำการให้สนามที่ต่างกัน ความถี่ที่ออกมาเป็นผลรวมความถี่ที่เข้าไป จากแนวคิดที่ว่ามีการถ่ายโอนของสนามแก่กันจนทำให้เกิดการรวมกันของความถี่ได้ โดยสามารถเขียนสมการความไม่เป็นเชิงเส้นของโพลาริเซชันลำดับที่ 2 ได้เป็น

$$P_{NL}^{(2)}(\omega = \omega_1 + \omega_2) = \epsilon_0 \chi^{(2)}(\omega_1, \omega_2) E(\omega_1) E(\omega_2) \quad (2.30)$$

สำหรับเวกเตอร์สนาม ที่ให้เข้าไป $3^2 = 9$ ที่ต่างกัน โดยที่เวกเตอร์สภาพความอ่อนไหวทางไฟฟ้าที่ $\chi^{(2)}$ เป็น $3^2 \times 3 = 27$ สำหรับสมาชิกของเมตริกซ์เทนเซอร์โดยเขียนสมการสำหรับ $\chi^{(2)}$ ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} P_{NLx}^{(2)}(\omega) \\ P_{NLy}^{(2)}(\omega) \\ P_{NLz}^{(2)}(\omega) \end{bmatrix} = \epsilon_0 \begin{bmatrix} \chi_{xxx}^{(2)} & \chi_{xxy}^{(2)} & \cdots & \chi_{xzz}^{(2)} \\ \chi_{yxx}^{(2)} & \chi_{yyx}^{(2)} & \cdots & \chi_{yzz}^{(2)} \\ \chi_{zxx}^{(2)} & \chi_{zxy}^{(2)} & \cdots & \chi_{zzz}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x(\omega_1) E_x(\omega_2) \\ E_x(\omega_1) E_y(\omega_2) \\ E_x(\omega_1) E_z(\omega_2) \\ E_y(\omega_1) E_x(\omega_2) \\ E_y(\omega_1) E_y(\omega_2) \\ E_y(\omega_1) E_z(\omega_2) \\ E_z(\omega_1) E_x(\omega_2) \\ E_z(\omega_1) E_y(\omega_2) \\ E_z(\omega_1) E_z(\omega_2) \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

จากสมการที่ 2.31 เขียนให้อยู่ในรูปที่ลดรูปได้เป็น

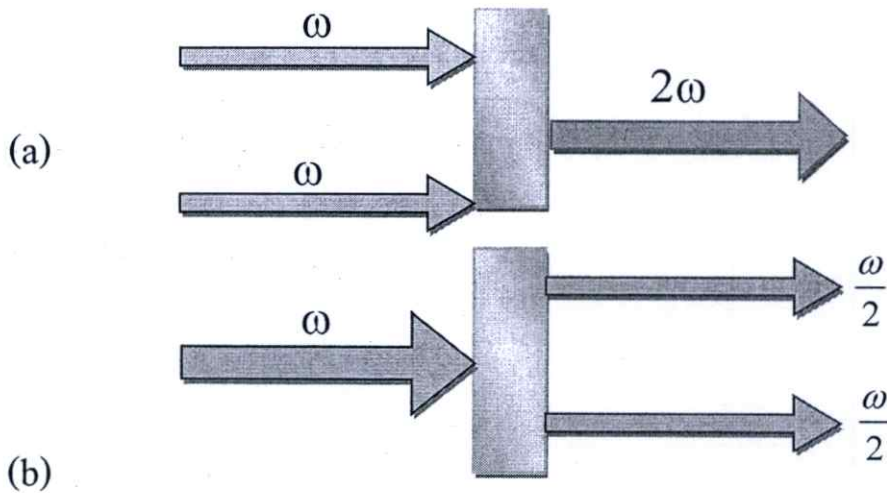
$$P_{NLi}^{(2)}(\omega = \omega_1 + \omega_2) = \epsilon_0 \sum_{jk} \chi_{ijk}^{(2)}(\omega_1, \omega_2) E_j(\omega_1) E_k(\omega_2) \quad (2.32)$$

เมื่อกำหนดให้ $i, j, k = x, y, z$

โดยสรุปในรูปแบบของฮาร์มอนิกลำดับที่สองจาก $\chi^{(2)}$ ได้เป็น

$$P_{NL}^{(2)} = \hat{P}_{NL}^{(2)} e^{j2\omega t} = \epsilon_0 \chi^{(2)} (2\omega, \omega, \omega) \hat{E}^2 e^{j2\omega t} \quad (2.33)$$

โดยสามารถสรุปการเกิดความถี่ในกรณีของ SHG ได้ 2 แบบคือ การรวมเป็นสองเท่าของความถี่เดิม ($\omega_{sum} = 2\omega$) เป็นผลจากการเสริมกันของพลังงาน และ การแบ่งความถี่ออกเป็นสองส่วนโดยในกรณีของ SHG ที่สนใจ ความถี่ทั้งสองที่ได้จะแบ่งเท่าๆกัน ($\omega_s = \omega_i = \frac{\omega}{2}$) สามารถเขียนเป็นแผนผังดังรูปที่ 2.3 ที่เป็นการแสดงการรวม และ แบบครึ่งของความถี่เดิม



รูปที่ 2.3 (a) แผนผังแสดงการรวมกันของความถี่ และ (b) การแบ่งกันของความถี่ต้น

ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ของโพลาไรซ์ (Third Order polarized)

ในกรณีของความไม่เป็นเชิงเส้นของโพลาไรเซชันสำหรับฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 (third order หรือ third harmonic) โดยในที่ทำการให้สนามที่ต่างกัน โดยความถี่ที่ให้เป็นที่ผลรวม ผลต่าง และแบบหลายค่าของความถี่ สำหรับความถี่ถูกสร้างในระบบของเนื้อสารเองที่เกิดจากฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 เอง และ ตัวของฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ด้วยเข้าไปในระบบ จากความถี่ที่เข้ามาจากภายนอกที่ให้เข้าไปด้วย จะสังเกตสามารถมองได้ว่าความถี่ที่เกิดขึ้นได้มีทั้งการรวมกันการลบกัน ทั้งรวมกันสามเทอม แม้แต่ อาจจะรวมกันเพียงสองเทอมก็ได้ สามารถที่จะเขียน ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 สำหรับโพลาไรเซชัน ได้เป็น

$$P_{NL}^{(3)}(\omega = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3) = \varepsilon_0 \chi^{(3)}(\omega_1, \omega_2, \omega_3) E(\omega_1) E(\omega_2) E(\omega_3) \quad (2.34)$$

จากสนามที่มีอยู่เป็นที่สนามภายในและภายนอก สำหรับสมาชิกของเวกเตอร์สนามที่มีผลอยู่แล้วเป็น $3^2 = 27$ โดยที่สำหรับ สภาพความอ่อนไหวทางไฟฟ้าที่ $\chi^{(3)}$ เพิ่มมาอีก ทำให้เวกเตอร์สมาชิกเป็น $3^3 \times 3 = 81$ โดยเขียนสมการของเมตริกซ์เทนเซอร์ของ $\chi^{(3)}$ ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} P_{NLx}^{(3)}(\omega) \\ P_{NLy}^{(3)}(\omega) \\ P_{NLz}^{(3)}(\omega) \end{bmatrix} = \varepsilon_0 \begin{bmatrix} \chi_{xxxx}^{(3)} & \chi_{xxxy}^{(3)} & \cdots & \chi_{xzzz}^{(3)} \\ \chi_{yxxx}^{(3)} & \chi_{yxyx}^{(3)} & \cdots & \chi_{yzzz}^{(3)} \\ \chi_{zxxx}^{(3)} & \chi_{zxyx}^{(3)} & \cdots & \chi_{zzzz}^{(3)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x(\omega_1) E_x(\omega_2) E_x(\omega_3) \\ E_x(\omega_1) E_x(\omega_2) E_y(\omega_3) \\ \cdots \\ E_z(\omega_1) E_z(\omega_2) E_y(\omega_3) \\ E_z(\omega_1) E_z(\omega_2) E_z(\omega_3) \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

จากสมการที่ 2.35 เขียนให้อยู่ในรูปที่ลครูปได้เป็น

$$P_{NLi}^{(3)}(\omega = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3) = \varepsilon_0 \sum_{jkl} \chi_{ijkl}^{(3)}(\omega_1, \omega_2, \omega_3) E_j(\omega_1) E_k(\omega_2) E_l(\omega_3) \quad (2.36)$$

จากทอมที่ศึกษาจะเห็นว่า มีทอมมากมายหลายค่า ที่มีผลต่อการเกิด ความไม่เป็นเชิงเส้นของ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะทำให้ได้ว่าความถี่ที่ออกมาหลายค่า ในเนื้อสารจริงจะต้องทำการพิจารณา $\chi^{(n)}$

ปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr effect)

ปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr effect) คือ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในเนื้อสารที่เป็นความไม่เป็นเชิงเส้นของการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหภายในเนื้อสาร โดยจะส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหตามความเข้มของสัญญาณ สำหรับ $\chi^{(2)}$ กระเจิงและหายไปภายใต้เงื่อนไขของโครงสร้างที่เป็นสัดส่วนกัน (Symmetric) ค่าที่ส่งผลต่อ ปรากฏการณ์เคอร์จึงมีเฉพาะ $\chi^{(3)}$ ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหของสาร สามารถสรุปเป็นสมการความสัมพันธ์ได้เป็น

$$n = n_0 + \frac{3}{8n_0} \chi^{(3)} |\hat{E}|^2 = n_0 + n_2 I \quad (2.37)$$

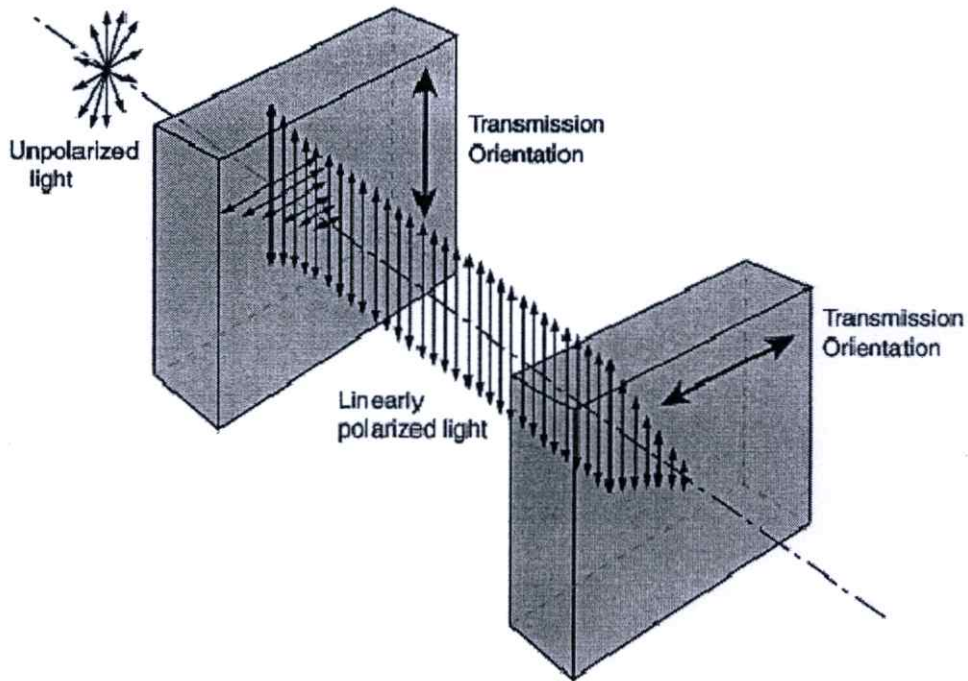
โดยที่ n เป็นค่าของดัชนีหักเหรวมทั้งหมด n_0 คือค่าของดัชนีหักเหของตัวสาร n_2 คือค่าดัชนีหักเหสำหรับความไม่ต่อเนื่องของสารเองหรือ ค่าคงที่ของเคอร์ (Kerr-constant) ได้จาก $n_2 = \frac{3\chi^{(3)}}{4\epsilon_0 cn_0^2}$ และ I เป็นค่าของความเข้มของสัญญาณแสง ได้จาก $I = \frac{1}{2} \epsilon_0 cn_0 |\hat{E}|^2$ โดยค่า n_2 สำหรับใยแก้วมีค่าในช่วง $n_2 = 2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ ในการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีภายในเนื้อสารที่ทำให้สัญญาณสิ่งที่มีผลก็คือ พื้นที่หน้าตัดในการส่งสัญญาณ (A_{eff}) สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$n = n_0 + n_2 \frac{P}{A_{eff}} \quad (2.38)$$

โดยที่ P เป็นกำลังสำหรับการใส่เข้าไปในพื้นที่หน้าตัดของแกนของสายใยแก้วนำแสง หรือ ความเข้มของแสงที่ให้เข้าไปสามารถเขียนให้อยู่ในรูปกำลังต่อพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่น โดยในการออกแบบวงแหวนขนาดเล็ก คือ พื้นที่หน้าตัดในการออกแบบท่อนำคลื่นของวงแหวนโปรงสันพ้องขนาดเล็กแบบไม่เป็นเชิงเส้น

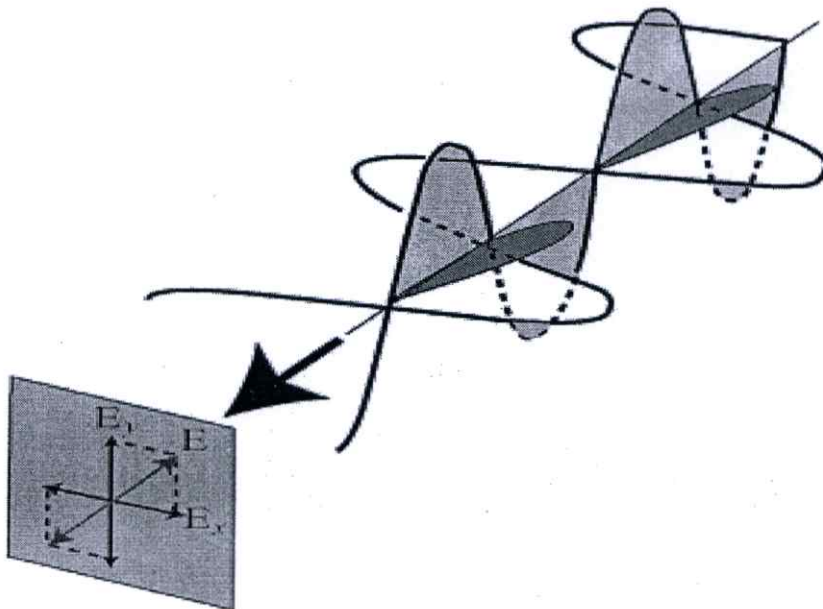
2.3 โพลาริเซชันของแสง (Polarization of light)

โพลาริเซชันของแสง (Polarization light) คือ การที่มีการสั่นของสนามเพียงระนาบเดียว โดยการสั่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของแสงจะมีทั้งสนามแม่เหล็ก และ สนามไฟฟ้า แต่ในที่นี้ระนาบของการสั่นแทนด้วยระนาบการสั่นของสนามไฟฟ้า สำหรับแสงที่อยู่ในธรรมชาติเป็นแสงที่ไม่โพลาริซ์ซึ่งมีระนาบการสั่นในทุกทิศทาง ถ้าต้องการทำให้แสงมีลักษณะเป็นโพลาริซ์จะต้องใช้ ผ่านตัวกรองแสงที่บังคับการสั่นให้เหลือทิศทางเดียว (polarizing filter) ที่ทำหน้าที่บังคับการสั่นของระนาบของแสงให้อยู่ในระนาบเดียว โดยจะยอมให้เฉพาะการสั่นที่เป็นระนาบเดียวกันกับแผ่นกรองได้ ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งจะเห็นว่าแม่แสงที่มีลักษณะที่มีการสั่นของสนามทุกทิศทางเมื่อผ่านแผ่นกรองจะเหลือเฉพาะระนาบที่ขนานกับระนาบแผ่นกรองที่ยอมให้ผ่านมาได้ จะเห็นได้ว่าเมื่อนำเอาแผ่นกรองและให้ระนาบของแผ่นกรองตั้งฉากกันซึ่งจะตัดระนาบการสั่นของสนามไฟฟ้าที่เหลือผ่านไม่ได้ จากการใช้แผ่นกรองสองแผ่นมาทำมุมกันเป็นทำควบคุมปริมาณของแสงที่ผ่านออกมาได้



รูปที่ 2.4 การโพลาไรเซชันของแสงผ่านตัวกรองแสงที่บังคับการสั่นให้เหลือทิศทางเดียว

สำหรับการอธิบายการโพลาไรเซชันของแสง สามารถที่จะแยกองค์ประกอบของแสงที่ผ่านจากการกรองของแผ่นโพลาลอยได้เป็นระนาบใหม่คือ XY



รูปที่ 2.5 องค์ประกอบของโพลาไรเซชัน

จากการสั้นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของแสงที่เหลือเป็น โพลาริเซชัน แบ่งเป็นแต่ละประเภทได้จากการที่ องค์ประกอบของ โพลาริเซชัน ในแนว xy มีมุมทางเดินที่ต่างกัน สมการการเคลื่อนที่ของการโพลาริเซชัน ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้เป็น

$$\begin{aligned}\vec{E}(r,t) &= \hat{i}E_{ox}e^{i(kz-\omega t+\phi_x)} + \hat{j}E_{oy}e^{i(kz-\omega t+\phi_y)} \\ &= \hat{i}E_{ox}\cos(kz-\omega t+\phi_x) + \hat{j}E_{oy}\cos(kz-\omega t+\phi_y)\end{aligned}\quad (2.39)$$

ได้ว่า

$\vec{E}(r,t)$ คือ สนามไฟฟ้าที่เป็นผลรวมจากสนามไฟฟ้าทั้งสอง

E_{ox}, E_{oy} คือ สันคลื่นสูงสุดของสนามไฟฟ้าในแนว x และ y (Amplitudes)

ϕ_x, ϕ_y คือ ที่เป็นมุมในการเคลื่อนที่ของสนาม (phase)

จากสมการที่ 2.39 ให้สามารถเขียนสมการเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าในแต่ละระนาบของการเคลื่อนที่ ได้เป็นดังนี้

$$\begin{aligned}\vec{E}_x(r,t) &= \hat{i}E_{ox}\cos(kz-\omega t+\phi_x) & \vec{E}_x(r,t) &= \hat{i}E_{ox}\cos(\tau+\phi_x) \\ \vec{E}_y(r,t) &= \hat{j}E_{oy}\cos(kz-\omega t+\phi_y) & \vec{E}_y(r,t) &= \hat{j}E_{oy}\cos(\tau+\phi_y)\end{aligned}\quad (2.40)$$

โดยที่ \vec{E}_x เป็นสนามที่สั้นในทิศทาง x, \vec{E}_y เป็นสนามที่สั้นในทิศทาง y และ แทน $kz-\omega t$ เป็น τ เพื่อให้ง่ายต่อการแก้สมการ จากสมการที่ 2.41 จัดรูปใหม่และทำการกระจายเทอมของ \cos ในเทอมของการบวกแล้ว หาค่าด้วยสันคลื่นได้ว่า

$$\begin{aligned}\frac{E_x}{E_{ox}} &= \cos\tau \sin\phi_x - \sin\tau \cos\phi_x \\ \frac{E_y}{E_{oy}} &= \cos\tau \sin\phi_y - \sin\tau \cos\phi_y\end{aligned}\quad (2.41)$$

แทนค่า จากสมการที่ 2.41 ในทั้งสองสมการของแต่ละเทอม แล้วจัดรูปใหม่ได้ว่า

$$\begin{aligned}\frac{E_x}{E_{ox}} \sin \phi_y - \frac{E_y}{E_{oy}} \sin \phi_x &= \cos \tau \sin(\phi_y - \phi_x) \\ \frac{E_x}{E_{ox}} \cos \phi_y - \frac{E_y}{E_{oy}} \cos \phi_x &= \sin \tau \sin(\phi_y - \phi_x)\end{aligned}\quad (2.42)$$

นำทั้งสองสมการที่ 2.42 ด้วยกันจะได้ดังนี้

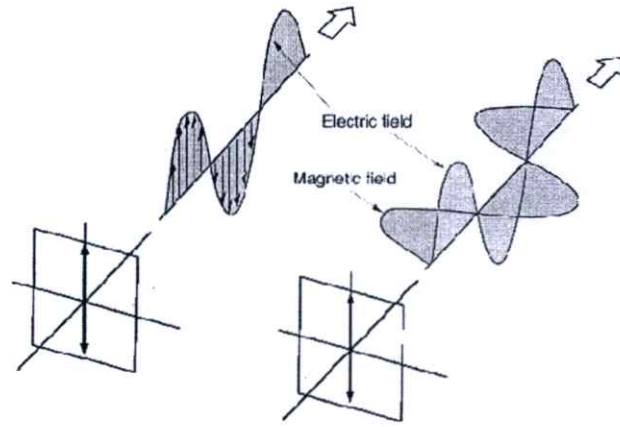
$$\frac{E_x^2}{E_{ox}^2} + \frac{E_y^2}{E_{oy}^2} - 2 \frac{E_x E_y}{E_{ox} E_{oy}} \cos(\phi) = \sin^2(\phi) \quad (2.43)$$

เมื่อกำหนดให้ $\phi = \phi_y - \phi_x$ เป็นเฟสที่ต่างกันของสนามในการสั่นของสนามในแนว x และ y จากสมการที่ทำให้เกิดรูปแบบของการเคลื่อนที่ของ โพลาริเซชัน ได้ 4 แบบด้วยกันดังนี้

1. ความเป็นเชิงเส้นของโพลาริเซชัน (Linear Polarized) คือ การสั่นของสนามไฟฟ้าใน แนวเส้น กลับไปกลับมาซ้ำเดิม ลงบนระนาบ xy โดยเกิดจากความต่างเฟสของสนามในแกน x และ y ต่างกันเป็น $\phi = 0$ และ $\phi = \pi$ จากสมการที่ 2.44 เมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขนี้ เขียนได้ในรูปใหม่ จากการสั่นของสนามของ x และ y ที่ว่า $E_{ox} = E_{oy} = E_0$ ได้ว่า เมื่อแทนค่าของมุมเข้าไปในสมการที่ 2.43 จะได้เป็น

$$\frac{E_x^2}{E_0^2} = \frac{E_y^2}{E_0^2} \quad \text{หรือ} \quad E_x = E_y \quad (2.44)$$

จะเห็นได้ว่าเป็นความสัมพันธ์ของสมการเส้นตรงเอง สามารถเขียนภาพประกอบการเคลื่อนที่ของการสั่นของสนามไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.6 ที่แสดง ทิศทางของการสั่นของสนามไฟฟ้า

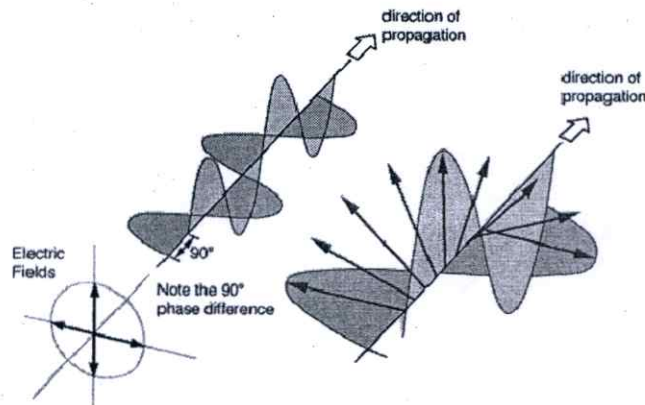


รูปที่ 2.6 รูปแบบการสั่นของสนามไฟฟ้าในกรณีที่ $\phi = 0$ และ $\phi = \pi$

2. ลักษณะวงกลมของโพลาไรซ์ (Circular Polarized) คือ มีสนามของการสั่นหมุนเป็นวงกลมที่ลงบนระนาบ xy โดยเกิดจากความต่างของเฟสของสนามในแกน x และ y ต่างกันเป็น $\phi = \frac{\pi}{2}$ และ $\phi = \frac{3\pi}{2}$ จากสมการที่ 2.43 เมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว และ จากการสั่นของสนามของ x และ y ที่ว่า $E_{ox} = E_{oy} = E_0$ ได้ว่า เมื่อแทนค่าของมุมเข้าไปในสมการที่ 2.43 จะได้เป็น

$$\frac{E_x^2}{E_0^2} = \frac{E_y^2}{E_0^2} = 1 \quad \text{หรือ} \quad E_x^2 + E_y^2 = 1 \quad (2.45)$$

จะเห็นได้ ว่าความสัมพันธ์ของสมการอยู่ในรูปแบบของสมการวงกลม โดยมีการเคลื่อนที่แบบหมุนเป็นเกลียวรอบแกน z และ เมื่อมองในระนาบของ xy แล้วจะเห็นว่าเป็นลักษณะของวงกลม

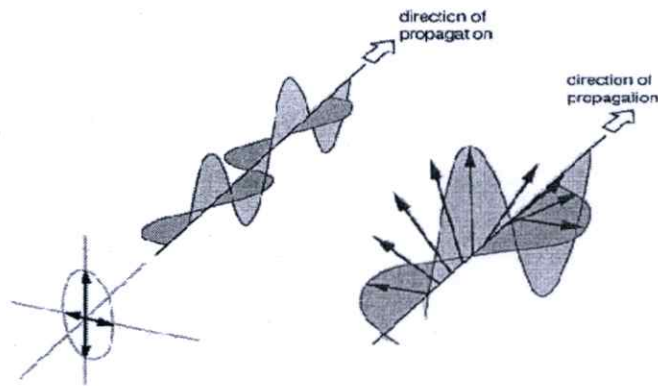


รูปที่ 2.7 รูปแบบการสั่นของสนามไฟฟ้าในกรณีที่ $\phi = \frac{\pi}{2}$ และ $\phi = \frac{3\pi}{2}$

3. ลักษณะวงรีของโพลาริซ (Elliptical Polarized) คือ มีสนามของการสั่นหมุนเป็นวงรี ลงบนระนาบ xy โดยเกิดจากความต่างของเฟสของสนามในแกน x และ y ต่างกันเป็น $\phi \neq 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$ จากสมการที่ 2.43 เมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไข จากสมการที่ 2.43 เมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว และ จากการสั่นของสนามของ x และ y ที่ว่า $E_{ox} = E_{oy} = E_o$ ได้ว่า เมื่อแทนค่าของมุมเข้าไปในสมการที่ 2.44 จะได้เป็น

$$\frac{E_x^2}{E_o^2} + \frac{E_y^2}{E_o^2} - \frac{E_x E_y}{E_o^2} \cos(\phi) = \sin^2(\phi) \quad (2.46)$$

โดยจะเห็นได้ว่า รูปแบบของสมการวงรี ที่มีการหมุนรอบแกน ของทิศทางการเคลื่อนที่ สามารถแสดงการเคลื่อนที่ของการสั่นของสนามไฟฟ้าได้ดังนี้



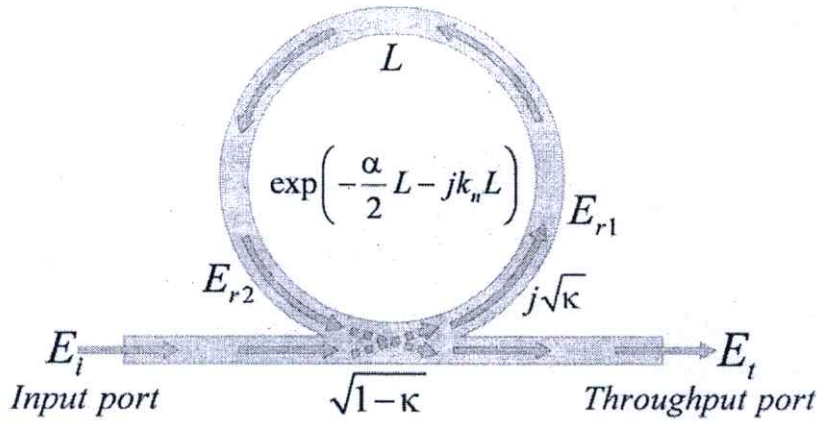
รูปที่ 2.8 รูปแบบการสั่นของสนามไฟฟ้าในกรณีที่ $\phi \neq 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$

4. ไม่มีรูปแบบการโพลาริซ (Unpolarized) คือเป็นรูปแบบการสั่นแบบการสุ่มโพลาริซหรือไม่มีรูปแบบการสั่นของสนามที่แน่นอน อาจเป็นการสั่นแบบผสมก็ได้

2.4 โพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็ก (Micro Ring Resonator)

โครงร่างอย่างง่ายของโพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็ก (Micro Ring Resonator) [26] เคียวที่มีคัปเปิลอร์เพียง 1 ตัวแสดงดังรูปที่ 2.9 ซึ่งมีเส้นรอบวงของวงแหวนเป็น L ($L = 2\pi R$; รัศมีคือ R) สัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงกำลังคือ K สัมประสิทธิ์การลดทอนความเข้มแสงของวงแหวนคือ α ค่าคงที่ของการแพร่กระจายคลื่น (Wave propagation constant) คือ k_n การวิเคราะห์อุปกรณ์ที่แสดงดังรูปข้างล่าง จะอธิบายการคัปปลิงของแสงที่เข้าและออกจากโพรงสั้นพ้อง ในทอมความสัมพันธ์ของการแยกลำแสงทั่วไป

โดยมีสัมประสิทธิ์การคัปปลิงตามเส้นทางทะลุผ่าน $(E_i \rightarrow E_t, E_{r2} \rightarrow E_{r1})$ มีค่าเป็น
 $y = \sqrt{(1-\gamma)(1-\kappa)}$ และตามเส้นทางทแยงมุม $(E_i \rightarrow E_{r1}, E_{r2} \rightarrow E_t)$ มีค่าเป็น
 $r = j\sqrt{(1-\gamma)\kappa}$



รูปที่ 2.9 โครงสร้างฟอโตนิกวงแหวนวงเดียว

ความสัมพันธ์สนามไฟฟ้าส่งผ่าน E_t และอินพุต E_i สามารถหาได้ดังนี้

$$E_t = (1-\gamma)^{1/2} \times [E_i \cdot \sqrt{1-\kappa} + j \cdot E_{r2} \sqrt{\kappa}] \quad (2.47)$$

$$E_{r1} = (1-\gamma)^{1/2} \times [j \cdot E_i \cdot \sqrt{\kappa} + E_{r2} \cdot \sqrt{1-\kappa}] \quad (2.48)$$

จากทฤษฎีการส่งผ่านแสง (Light transmission theory) ในระบบเชิงแสงที่เป็นเชิงเส้น สนามไฟฟ้าของคลื่นแสงที่เคลื่อนที่ไปได้ในแต่ละส่วนระยะทางอธิบายได้ด้วยสมการ

$$E_{segment} = E_A \cdot \exp\left(-\frac{\alpha_{segment}}{2} \cdot L_{segment} - j \cdot k_n \cdot L_{segment}\right) \quad (2.49)$$

เมื่อ E_A คือ แอมพลิจูดสนาม, $L_{segment}$ คือ ความยาวทางเดินแสงในแต่ละส่วน ความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าที่ปลายทั้งสองของวงแหวนคือ

$$E_{r2} = E_{r1} \cdot \exp\left(-\frac{\alpha}{2} \cdot L - j \cdot k_n \cdot L\right) \quad (2.50)$$

ในที่นี้ $k_n = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda}$ และ γ แทนสัมประสิทธิ์การสูญเสียความเข้มแสงอินพุตของคัปเปิลอร์ และ n_{eff} คือ ดัชนีหักเหประสิทธิผล (effective refractive index) โดยใช้สมการ (2.48), (2.49) และ (2.50) สามารถคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอน E_t/E_i ได้เป็น

$$\frac{E_t}{E_i} = (1-\gamma)^{1/2} \times \left[\frac{\sqrt{1-\kappa} - (1-\gamma)^{1/2} \cdot \exp\left(-\frac{\alpha}{2} \cdot L - j \cdot k_n \cdot L\right)}{1 - (1-\gamma)^{1/2} \cdot \sqrt{1-\kappa} \cdot \exp\left(-\frac{\alpha}{2} \cdot L - j \cdot k_n \cdot L\right)} \right] \quad (2.51)$$

เพื่อให้ง่ายในการแก้สมการจะกำหนดพารามิเตอร์ตัวใหม่ดังนี้

$$\begin{aligned} D &= (1-\gamma)^{1/2} \\ x &= D \cdot \exp\left(-\frac{\alpha}{2} \cdot L\right) \\ y &= \sqrt{1-\kappa} \\ \phi &= k_n \cdot L \end{aligned} \quad (2.52)$$

ความสัมพันธ์ความเข้มแสงของพอร์ตเอาต์พุต (I_t) เทียบกับพอร์ตอินพุต (I_i) กำหนดได้เป็น

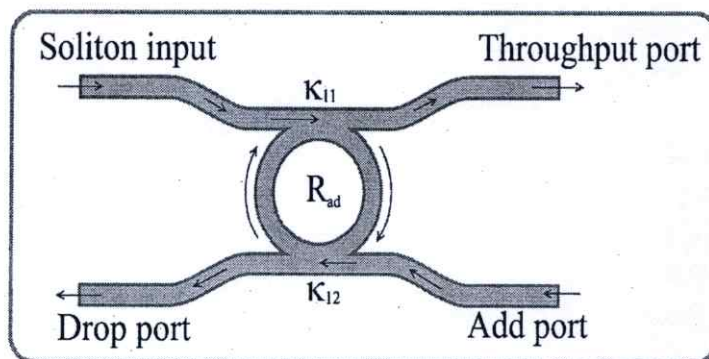
$$\frac{I_t}{I_i} = \left| \frac{E_t}{E_i} \right|^2 = D^2 \cdot \left[1 - \frac{(1-x^2) \cdot (1-y^2)}{(1-x \cdot y)^2 + 4 \cdot x \cdot y \cdot \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)} \right] \quad (2.53)$$

แต่สำหรับในการทดลองจะวัดสัญญาณของความเข้มของแสงที่ออกมาเท่านั้น จากสมการที่ 2.50 เป็นการวัดที่เกิดจากการสูญเสียที่เกิดจากอุปกรณ์ที่ทำการกรองของโพรงสั่นพ้องวงแหวนวงเดียว ที่สัญญาณแสงผ่านเข้าไป สำหรับสัญญาณความเข้มที่ผ่านออกมาเขียนสมการได้ใหม่เป็น

$$I_t = D^2 \cdot \left[1 - \frac{(1-x^2) \cdot (1-y^2)}{(1-x \cdot y)^2 + 4 \cdot x \cdot y \cdot \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)} \right] \cdot I_i \quad (2.54)$$

จากสมการที่ 2.54 เป็นสมการสำหรับการส่งผ่านของโพรงสั่นพ้องวงแหวนที่เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เป็นผลจากการแก้สมการของสนามไฟฟ้าภายในท่อนำคลื่น

โพรงสั่นพ้องวงแหวนแอดดรอป



รูป 2.10 แสดงโพรงสั่นพ้องวงแหวนแอดดรอป

$$\left| \frac{E_t}{E_{in}} \right|^2 = \frac{(1 - \kappa_1) - 2\sqrt{1 - \kappa_1} \cdot \sqrt{1 - \kappa_2} e^{-\frac{\alpha}{2}L} \cos(k_n L) + (1 - \kappa_2)e^{-\alpha L}}{1 + (1 - \kappa_1)(1 - \kappa_2)e^{-\alpha L} - 2\sqrt{1 - \kappa_1} \cdot \sqrt{1 - \kappa_2} e^{-\frac{\alpha}{2}L} \cos(k_n L)} \quad (2.55)$$

$$\left| \frac{E_d}{E_{in}} \right|^2 = \frac{\kappa_1 \kappa_2 e^{-\frac{\alpha}{2}L}}{1 + (1 - \kappa_1)(1 - \kappa_2)e^{-\alpha L} - 2\sqrt{1 - \kappa_1} \cdot \sqrt{1 - \kappa_2} e^{-\frac{\alpha}{2}L} \cos(k_n L)} \quad (2.56)$$

สมการสุดท้าย สำหรับการส่งผ่านของ โพรงสั้นพ้องวงแหวนที่เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เป็นผลจากการแก้สมการของสนามไฟฟ้าภายในท่อนำคลื่นวงเดียวสำหรับตัวกรองสัญญาณแอดครอป

E_t = Throughput port

E_{in} = Input

E_d = Drop port

$k_n = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda}$ n_{eff} คือ ดัชนีหักเหประสิทธิผล K สัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงกำลังแสง

α เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนความเข้มแสงของวงแหวนและ L เป็นเส้นรอบวงของวงแหวน

2.5 พัลส์โซลิตอน (Soliton pulse)

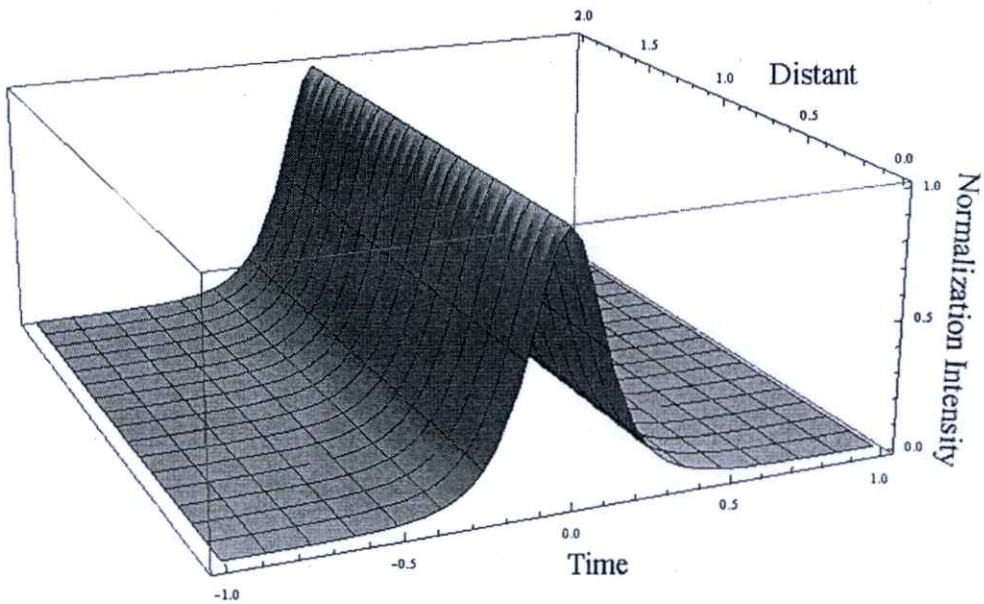
สำหรับสัญญาณในการสร้างแบบจำลองในงานวิจัย พัลส์โซลิตอน

พัลส์โซลิตอน (Soliton pulse)

สำหรับสมการทางคณิตศาสตร์ของพัลส์โซลิตอนเป็นผลจากเทอมความไม่เป็นเชิงเส้นของเนื้อสารทำให้เกิดการรวมกันของเฟสที่ต่างกันในพัลส์ขึ้น (self-phase modulation และ cross-phase modulation) ผลดังกล่าวกับเป็นผลดีของพัลส์ คือลักษณะของโซลิตอน ที่มีแอมพลิจูดคงที่เมื่อส่งไปในสายสัญญาณไม่มีการสูญเสียเกิดขึ้น สามารถเขียนสมการสำหรับพัลส์โซลิตอน ได้ดังนี้

$$E_{in}(t) = A \operatorname{sech} \left[\frac{T}{T_0} \right] \exp \left[\left(\frac{z}{2L_D} \right) - i\omega_0 t \right] \quad (2.57)$$

จากสมการดังกล่าวสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ของการเดินทางของ โขลิตอนภายในใยแก้วนำแสงได้ดังรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าสัญญาณยังคงรักษาความสูงของแอมพลิจูดตามเงื่อนไขของสมการตามแกนความยาวที่เป็นผลจากเทอมของ $\exp\left(\frac{z}{2L_D}\right)$ ตามระยะทางของ L_D แอมพลิจูด จะยังคงเดิมเหมือนเริ่มต้น สำหรับเทอมของ $\operatorname{sech}\left[\frac{T}{T_0}\right]$ เป็นการกระจายในแกนของเวลาที่ เป็นผลจากการพิจารณาเทอมของความไม่เป็นเชิงเส้นของแสงเข้าไป เกิดการรวมกันของเฟสที่ต่างกันในพัลส์ เมื่อเขียนกราฟสามมิติในการอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะของพัลส์ โขลิตอนตามระยะทาง

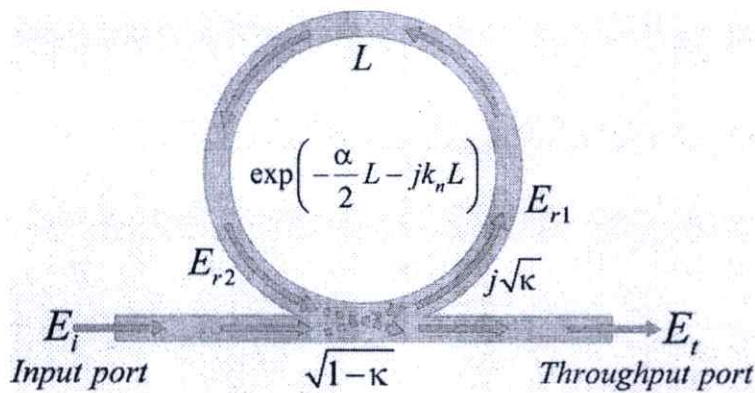
บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

สำหรับขั้นตอนการดำเนินงานนี้เริ่มจากการสร้างแบบจำลองของวงแหวนในการกรอง สำหรับการสร้างความไม่เป็นเชิงเส้นของแสงภายในแบบจำลองของวงแหวนขนาดเล็กที่ทำให้เกิดความยาวคลื่นต่างๆ ใช้แบบจำลองวงแหวนขนาดเล็ก กรองสัญญาณที่ได้แถบสัญญาณที่กว้าง สำหรับพัลส์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง คือ พัลส์โซลิตอน โดยในขั้นแรกในการทำการศึกษาก็จะใช้พัลส์เกาส์เซียนในการศึกษา เพื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการสร้างโดยใช้พัลส์โซลิตอน สำหรับเป้าหมายสูงสุดของงานวิจัยคือสามารถสร้างสัญญาณที่ได้จาก การกรองของวงแหวนกำหนดขนาดเล็ก ในรูปแบบของความยาวคลื่นแบบต่อเนื่องได้

3.1 การศึกษาโพรงสั่นพ้องวงแหวนขนาดเล็กวงแหวนขนาดเล็กโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

โพรงสั่นพ้องวงแหวนขนาดเล็ก แบบวงแหวนใยแก้วนำแสง เกิดจากการนำใยแก้วชนิดโหมดเดียว ประกอบร่วมกับคัปเปิลอร์ใยแก้วนำแสง ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โมเดลโพรงสั่นพ้องวงแหวนขนาดเล็กแบบวงแหวนท่อนำคลื่นที่ประกอบด้วยคัปเปิลอร์

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกส่งเข้าทางปลายท่อนำคลื่นด้านหนึ่ง ของโพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็กผ่านบริเวณคัปปลิงของคัปเปิลอร์โพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็ก คลื่นแสงถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนตามอัตราการแบ่งกำลังแสงของคัปเปิลอร์ κ แสงส่วนแรกถูกส่งผ่านไปยังปลายอีกด้านของใยแก้วนำแสงเป็นสัญญาณเอาต์พุต แสงส่วนที่สองถูกส่งเข้าสู่วงแหวนซึ่งมีความยาว L แล้วจึงเดินทางผ่านเข้าสู่บริเวณคัปปลิงของคัปเปิลอร์อีกครั้ง แสงถูกส่งหมุนวนต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งถูกลดทอน ภายในใยแก้วจนหมด

สมมติว่าไม่มีการสูญเสียของคัปเปิลอร์และไม่เกิดการสูญเสียในใยแก้วนำแสงที่เป็นโพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็กแบบวงแหวน (ปกติมีการสูญเสียน้อยมากในท่อนำคลื่นประมาณ 0.2 เดซิเบลต่อกิโลเมตร) สนามไฟฟ้า E_1 และ E_{out} ที่ประกอบด้วยสนามส่วนการส่งผ่านและสนามที่วนรอบภายในวงแหวนขนาดเล็ก แสงสามารถเขียนได้เป็น

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

เมื่อ κ คือ อัตราส่วนการแยกกำลังของคัปเปิลอร์ นั่นคือ $\kappa/(1-\kappa)$ โดยที่อัตราส่วนกำลังแสง κ จะถูกส่งเข้าไปในวงแหวนท่อนำคลื่น ส่วนอัตราส่วนกำลังแสง $1-\kappa$ จะถูกส่งไปยัง E_{out} โดยตรง พิจารณาการเดินทางของสนามไฟฟ้าจาก E_1 ไปยัง E_2 ในสภาวะคงที่สามารถหาได้จากสมการเดินทางคลื่นแสงแบบไม่เป็นเชิงเส้น

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

ทำการอินทิเกรตสมการ (3.2) จะได้ความสัมพันธ์ได้ดังนี้

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

โดยที่ E_1 คือ สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งแรกของวงแหวนถัดจากคัปเปิลอร์

E_2 คือ สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งสุดท้ายของวงแหวนก่อนวนเข้าสู่คัปเปิลอร์

E_{in} คือ สนามไฟฟ้าอินพุต

E_{out} คือ สนามไฟฟ้าเอาต์พุต

และ

$$\phi = \phi_L + \phi_{NL} \quad (3.4)$$

เมื่อ ϕ_L คือ เฟสเปลี่ยนแบบเชิงเส้น (linear phase shift) และเฟสที่เปลี่ยนไม่เป็นแบบเชิงเส้นที่วนรอบในวงแหวนใยแก้วนำแสง คือ

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

เมื่อ λ_0 คือ ความยาวคลื่นของแสงเดินทางในสุญญากาศ และ A_{eff} คือ พื้นที่ของแกนยังผลของท่อนำคลื่นแทนสมการที่ (3.2) ในสมการที่ (3.1) และเขียนเป็นรูปแบบของสมการการวนซ้ำ (iterative equation) ที่ขึ้นกับเวลาได้เป็น

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

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

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

เมื่อตัวห้อย “n” แทนจำนวนการวนรอบรูปภายในวงแหวนท่อนำคลื่น

พิจารณาที่สภาวะคงที่ จากสมการที่ (3.6) จะได้ว่า

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

และสนามไฟฟ้าเอาต์พุตที่สภาวะคงที่

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

หรือ

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

จากสมการที่ (3.9) จะได้กำลังแสงหรือความเข้มแสงเป็น

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

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

สมการ (3.7) และ (3.11) คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพลวัตแบบไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้ จะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโพรงสั่นพ้องวงแหวนขนาดเล็กแบบวงแหวนคือ ความยาววงแหวน (L) อัตราการแบ่งกำลังการคัปปลิงแสง (κ) การเปลี่ยนเฟสแบบเชิงเส้นในโพรงสั่นพ้องวงแหวนขนาดเล็กแบบวงแหวน ดัชนีหักเหแบบ-ไม่เป็นเชิงเส้นและค่าสัญญาณอินพุต (P_{in}) ซึ่งใช้ในการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นของโพรงสั่นพ้องวงแหวนขนาดเล็กแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงดังจะกล่าวต่อไป

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น ของโพรงสั่นพ้องวงแหวนขนาดเล็ก โดยพิจารณาลำแสงอินพุตเป็นสัญญาณของการกระจายแบบ

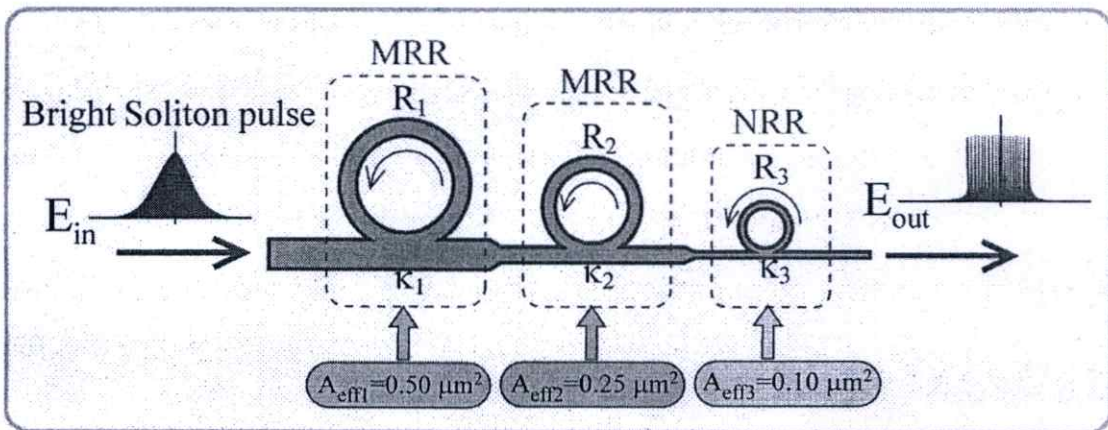
$$P_{in} = P_0 \exp \left[- \left(\frac{x-y}{z} \right)^2 \right] \quad (3.12)$$

โดยค่าความยาวคลื่น (λ_0) ในย่านการสื่อสารเท่ากับ 1.55×10^{-6} เมตร ดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้นของ GaInAsP/InP (n_2) อยู่ในช่วง $2.2 - 3.4 \times 10^{-15} \text{ m}^2 / \text{W}$ [8] พื้นที่หน้าของแกนท่อนำคลื่นชนิดโหมดเดี่ยว (A_{eff}) เท่ากับ 0.1-0.5 ตารางไมโครเมตร อัตราการแบ่งกำลังการคัปปลิงแสง (κ) 0.01 - 0.99 และรัศมีของโพรงสั่นพ้อง (R) 10-30 ไมโครเมตร โดยจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเอาต์พุตเมื่อคลื่นแสงเดินทางวนในวงแหวนครบ 20,000 รอบ และสัญญาณเอาต์พุตจะเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของความเข้มแสง (I_r) หรือกำลังแสงเอาต์พุต (P_{out}) ตามความสัมพันธ์

$$I_{out} \propto P_{out} \propto |E_{out}|^2 \quad (3.13)$$

3.2 แบบจำลองการสร้างแถบสัญญาณที่กว้างโดยอาศัยโพรงสั่นพ้องวงแหวนขนาดเล็กระดับนาโนเมตรอินพุทเป็นพัลส์โซลิตอน

วัตถุประสงค์ในการศึกษาขั้นตอนนี้เป็นการจำลองผลของดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้น (n_2) ของ GaInAsP/InP แกนท่อนำคลื่นชนิดโหมดเดี่ยวที่มีค่า $2.2 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{W}$ ที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในโพรงสั่นพ้องวงแหวนขนาดเล็กวงแหวนขนาดเล็ชนิดโหมดเดี่ยว โดยกำหนดให้การเปลี่ยนเฟสแบบเชิงเส้นคงที่ ($\phi_2 = 0$) รัศมีของวงแหวน 5 - 10 μm อัตราส่วนการคับปลิงกำลังแสง (κ) เป็น 0.03 - 0.1 พื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่น (A_{eff}) เป็น 0.1 - 0.50 μm^2 สัญญาณเป็นพัลส์โซลิตอนโดยให้อินพุทมีกำลัง (P_{in}) เป็น 650 mW และ ความยาวคลื่นกลาง (λ_0) คือ 1550 nm โดยแผนผังในการทำงานวิจัยสำหรับการสร้างแถบสัญญาณที่กว้างโดยใช้โพรงสั่นพ้องวงแหวนขนาดเล็กวงแหวนขนาดเล็กรูปที่ 3.2 จากรูปแสดงการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่นเพื่อไปเป็นระดับนาโนเมตร สำหรับพื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่นของระดับนาโนเมตรเป็น 0.10 μm^2 [28] ขยายกำลังเอาท์พุทเพื่อเป็นการเพิ่มความเข้มสัญญาณของระบบ เห็นได้ว่าไม่สามารถที่จะให้พัลส์ที่มีขนาดใหญ่กับระบบขนาดเล็กได้ในแนวทางการแก้ปัญหาจึงให้กับระบบของท่อนำคลื่นขนาดใหญ่แล้วลดลงมาตามลำดับเพื่อใส่พัลส์เข้าไปในระบบที่เป็นนาโนเมตร



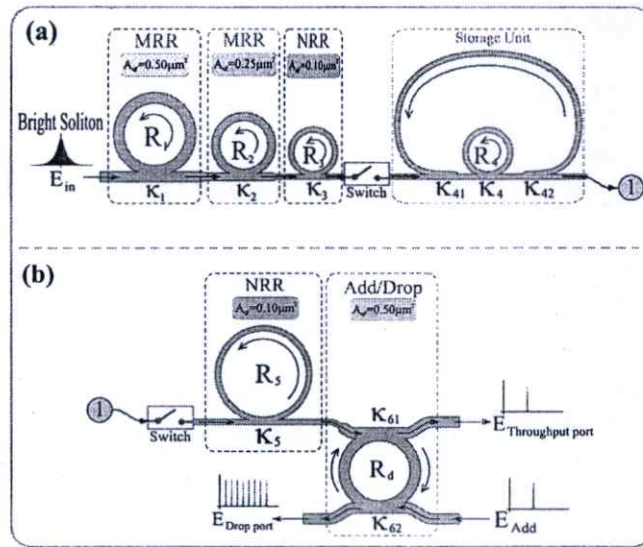
รูปที่ 3.2 แผนผังการสร้างแถบสัญญาณที่กว้างโดยอาศัยโพรงสั่นพ้องวงแหวนขนาดเล็กแบบนาโนเมตร

การสร้างแถบสัญญาณที่กว้าง อาศัยความไม่เป็นเชิงเส้นของเนื้อสารที่ใช้ทำท่อนำคลื่นของโพรงสั่นพ้องวงแหวนขนาดเล็ก และ คุณสมบัติของโซลิตอน โดยในวงแหวนแรก R_1 และ κ_1 วงแหวนเริ่มต้นที่สำคัญในการสร้างการเกิดความไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อสัญญาณอินพุทเป็นแบบโซลิตอนที่มีสมบัติเป็นการรวมเฟสกันของพัลส์สัญญาณ ส่วนของโพรงสั่นพ้องวงแหวนขนาดเล็กวงแหวนที่ R_2 , และ R_3 ทำหน้าที่ในการ

กรองสัญญาณที่ได้จากวงแหวน R_1 ให้เหลือเฉพาะแถบ ความยาวคลื่นที่ต้องการ โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของวงแหวน และ การคับปลิง ที่เหมาะสม อีกอย่างหนึ่งที่เป็นความสำคัญในการสร้างแถบต่อเนื่องคือ การเปลี่ยนค่าของพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่น จาก $A_{eff} = 0.50 \mu\text{m}^2$, $A_{eff} = 0.25 \mu\text{m}^2$ และ $A_{eff} = 0.10 \mu\text{m}^2$ ตามลำดับ โดยสิ่งที่เป็นตัวกำหนดวงแหวนระดับนาโนเมตรคือค่าของพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่น

3.3 แบบจำลองการสร้างแถบสัญญาณที่กว้าง การเก็บสัญญาณ และการให้กำเนิดแถบสัญญาณที่กว้างอีกครั้ง โดยอาศัยโพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็กระดับนาโนเมตรอินพุทเป็นพัลส์โซลิตอน

วัตถุประสงค์ในการศึกษาขั้นตอนนี้เป็นการจำลองผลของดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้น (n_2) ของ GaInAsP/InP แกนท่อนำคลื่นชนิดโหมดเดี่ยวที่มีค่า $2.2 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{W}$ ที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในโพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็กวงแหวนขนาดเล็กชนิดโหมดเดี่ยว โดยกำหนดให้การเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นคงที่ $\phi_L = 0$ รัศมีของวงแหวน 5 - 15 μm อัตราส่วนการคับปลิงกำลังแสง (κ) เป็น 0.1 - 0.95 พื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่น (A_{eff}) เป็น 0.1 - 0.50 μm^2 สัญญาณเป็นพัลส์โซลิตอนโดยให้อินพุทมีกำลัง (P_{in}) เป็น 650 mW และ ความยาวคลื่นกลาง (λ_0) คือ 1550 nm โดยแผนผังในการทำงานวิจัยสำหรับการสร้างแถบสัญญาณที่กว้างโดยใช้โพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็กวงแหวนขนาดเล็กดังรูปที่ 3.3 จากรูปแสดงการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่นเพื่อไปเป็นระดับนาโนเมตร สำหรับพื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่นของระดับนาโนเมตรเป็น 0.10 μm^2 ขยายกำลังเอาท์พุทเพื่อเป็นการเพิ่มความเข้มสัญญาณของระบบ เห็นได้ว่าไม่สามารถที่จะให้พัลส์ที่มีขนาดใหญ่กับระบบขนาดเล็กได้ในแนวทางการแก้ปัญหาจึงให้กับระบบของท่อนำคลื่นขนาดใหญ่แล้วลดลงตามลำดับเพื่อใส่พัลส์เข้าไปในระบบที่เป็นนาโนเมตร



รูปที่ 3.3 แผนผังการสร้างแถบสัญญาณที่กว้างโดยอาศัยโครงสร้างวงแหวนขนาดเล็กแบบนาโนเมตร

การสร้างแถบสัญญาณที่กว้าง อาศัยความไม่เป็นเชิงเส้นของเนื้อสารที่ใช้ทำท่อนำคลื่นของโครงสร้างวงแหวนขนาดเล็ก และ คุณสมบัติของโซลิตอน โดยในวงแหวนแรก R_1 และ K_1 วงแหวนเริ่มต้นที่สำคัญในการสร้างการเกิดความไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นแบบโซลิตอนที่มีสมบัติเป็นการรวมเฟสกันของพัลส์สัญญาณ ส่วนของโครงสร้างวงแหวนขนาดเล็กวงแหวนที่ R_2 , และ R_3 ทำหน้าที่ในการกรองสัญญาณที่ได้จากวงแหวน R_1 ให้เหลือเฉพาะแถบความยาวคลื่นที่ต้องการที่สะอาดไม่มีการปนของความยาวคลื่นอื่นที่ไม่ต้องการออก โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของวงแหวน และการคัปปลิง ที่เหมาะสม อีกอย่างหนึ่งที่เป็นความสำคัญในการสร้างแถบสัญญาณที่กว้างคือ การเปลี่ยนค่าของพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่น จาก $A_{em1} = 0.50 \mu\text{m}^2$, $A_{em2} = 0.25 \mu\text{m}^2$ และ $A_{em3} = 0.10 \mu\text{m}^2$ ตามลำดับ โดยสิ่งที่เป็นตัวกำหนดวงแหวนระดับนาโนเมตรคือค่าของพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่น สัญญาณที่ได้จากวงแหวนต้นพ้องข้างต้นสามารถ เก็บได้ภายในหน่วยเก็บสัญญาณ ที่เป็นวงแหวนต้นพ้องขนาดนาโน R_4 มีรัศมี 5-20 μm และ R_d มีรัศมี 4 μm -5 μm โดยอัตราส่วนการคัปปลิง กำลังแสง เป็น K_5 เป็น 0.5-0.9 ซึ่งทำหน้าที่แบ่งกำลังแสงเข้าไปภายในเข้าไปในวงแหวน สัญญาณที่ได้จากวงแหวนต้นพ้องข้างต้นสามารถนำมารองอีกครั้งโดยวงแหวนต้นพ้องรัศมีขนาด R_5 เป็น 20 μm อัตราส่วนคัปปลิงกำลังแสง $K_5 = 0.1$ จากนั้นผ่านตัวกรองสัญญาณ แอดดรอปรัศมี $R_d = 20 \mu\text{m}$ อัตราส่วนคัปปลิงกำลังแสง เป็น $K_1 = 0.1$, $K_2 = 0.1$ สามารถให้กำเนิดสัญญาณออกมาได้ ตามที่ต้องการ

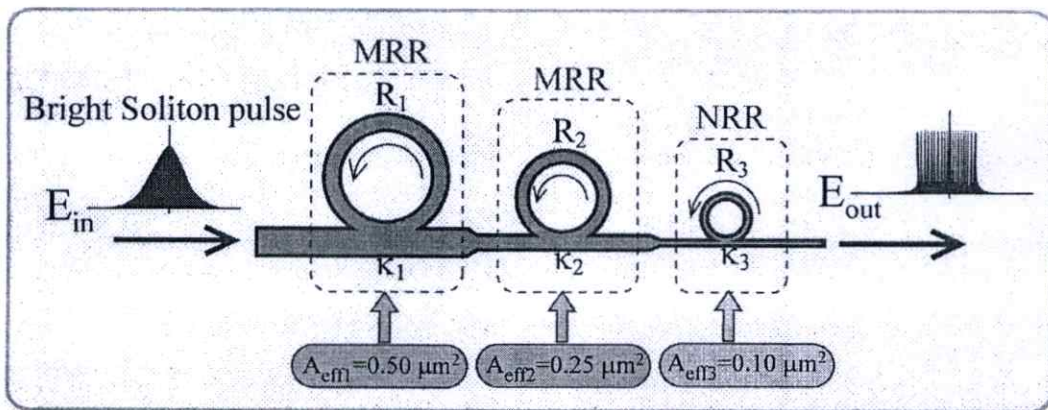
บทที่ 4

ผลการทดลอง

การทดลองผลจากการอินพุตเป็นพัลส์โซลิตอน (Soliton pulse) สำหรับการกรองของโพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็กทำจากวัสดุที่ไม่เป็นเชิงเส้น (GaInAsP/InP) สุดท้ายเป็นการสร้างสัญญาณแถบความยาวคลื่นแบบต่อเนื่อง การขยายแสง การเก็บแสง และให้กำเนิดแถบสัญญาณที่กว้างได้อีกครั้ง โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของรัศมี สัมประสิทธิ์การกลับปลิง และพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่นแสง

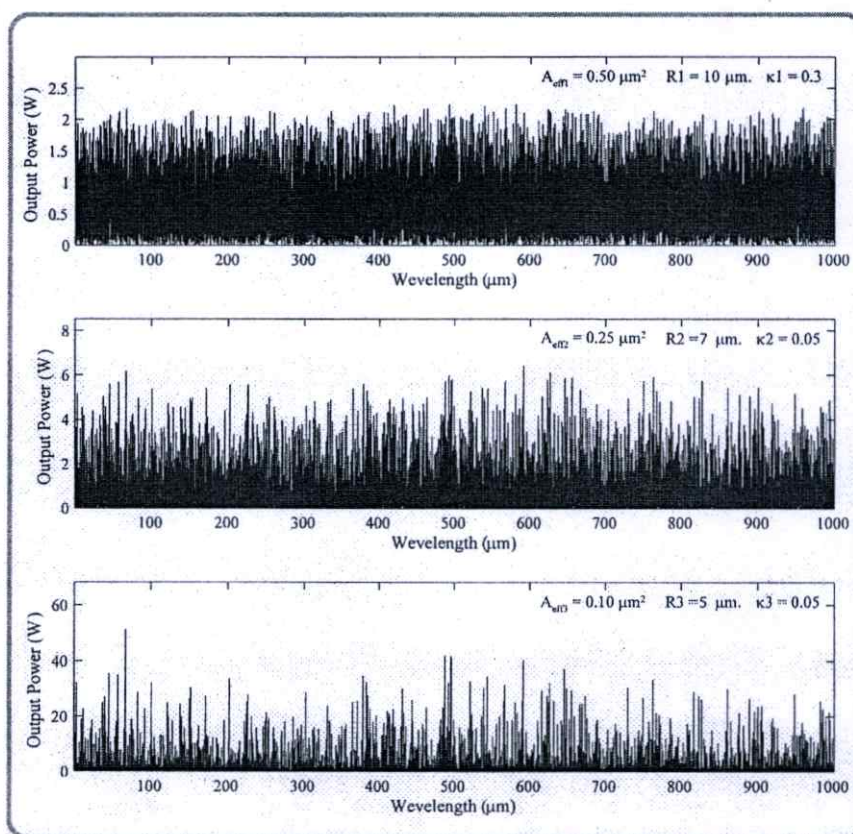
4.1 การสร้างแถบสัญญาณที่กว้างโดยใช้สัญญาณอินพุตเป็นโซลิตอนโดยอาศัยวงแหวนขนาดเล็กระดับนาโนเมตร

การจำลองผลของดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้น GaInAsP/InP (n_2) ของแกนท่อนำคลื่นแสงชนิดโหมคเดี่ยวมีค่าอยู่ที่ $2.2 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{W}$ ที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กชนิดโหมคเดี่ยว โดยกำหนดให้การเปลี่ยนเฟสแบบเชิงเส้นคงที่ ($\phi_c = 0$) รัศมีของวงแหวน 10 - 30 μm อัตราส่วนการกลับปลิงกำลังแสง (κ) เป็น 0.001 - 0.99 พื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่นแสง (A_{eff}) เป็น 0.10 - 0.50 μm^2 สัญญาณเป็นพัลส์โซลิตอนโดยให้อินพุตมีกำลัง (Pin) เป็น 650 mW และ ความยาวคลื่นกลาง (λ_0) คือ 1550 นาโนเมตร โดยแผนผังในการทำงานวิจัยสำหรับการสร้างแถบความยาวคลื่นแบบต่อเนื่อง จากการกรองโดยใช้โพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แบบจำลองการกรองของโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กเมื่ออินพุตเป็นโซลิตอนสำหรับโพรงสั้นพ้องระดับนาโนเมตร

โดยการสร้างแถบความยาวคลื่นแบบต่อเนื่อง อาศัยความไม่เป็นเชิงเส้นของเนื้อสารที่ใช้ทำท่อนำคลื่น แสงของโพรงสั่นพ้อง และ คุณสมบัติของโซลิตอน โดยในวงแหวนแรก R_1 และ K_1 วงแหวนเริ่มต้นที่สำคัญในการสร้างการเกิดความไม่เป็นเชิงเส้น ส่วนของโพรงสั่นพ้องวงแหวนที่ R_2 , และ R_3 ทำหน้าที่ในการกรองสัญญาณที่ได้จากวงแหวน R_1 ให้เหลือเฉพาะแถบความยาวคลื่นที่ต้องการที่สะอาดไม่มีการปนของความยาวคลื่นอื่นที่ไม่ต้องการออก โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของวงแหวน และ การคัปปลิง ที่เหมาะสม อีกอย่างหนึ่งที่เป็นความสำคัญในการสร้างแถบความยาวคลื่นแบบต่อเนื่องคือ การเปลี่ยนค่าของพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่น แสง จาก $A_{em1} = 0.50 \mu\text{m}^2$, $A_{em2} = 0.25 \mu\text{m}^2$ และ $A_{em3} = 0.10 \mu\text{m}^2$ ตามลำดับ เพื่อสร้างแถบความยาวคลื่นที่เกิดให้มากขึ้น



รูป A

รูป B

รูป C

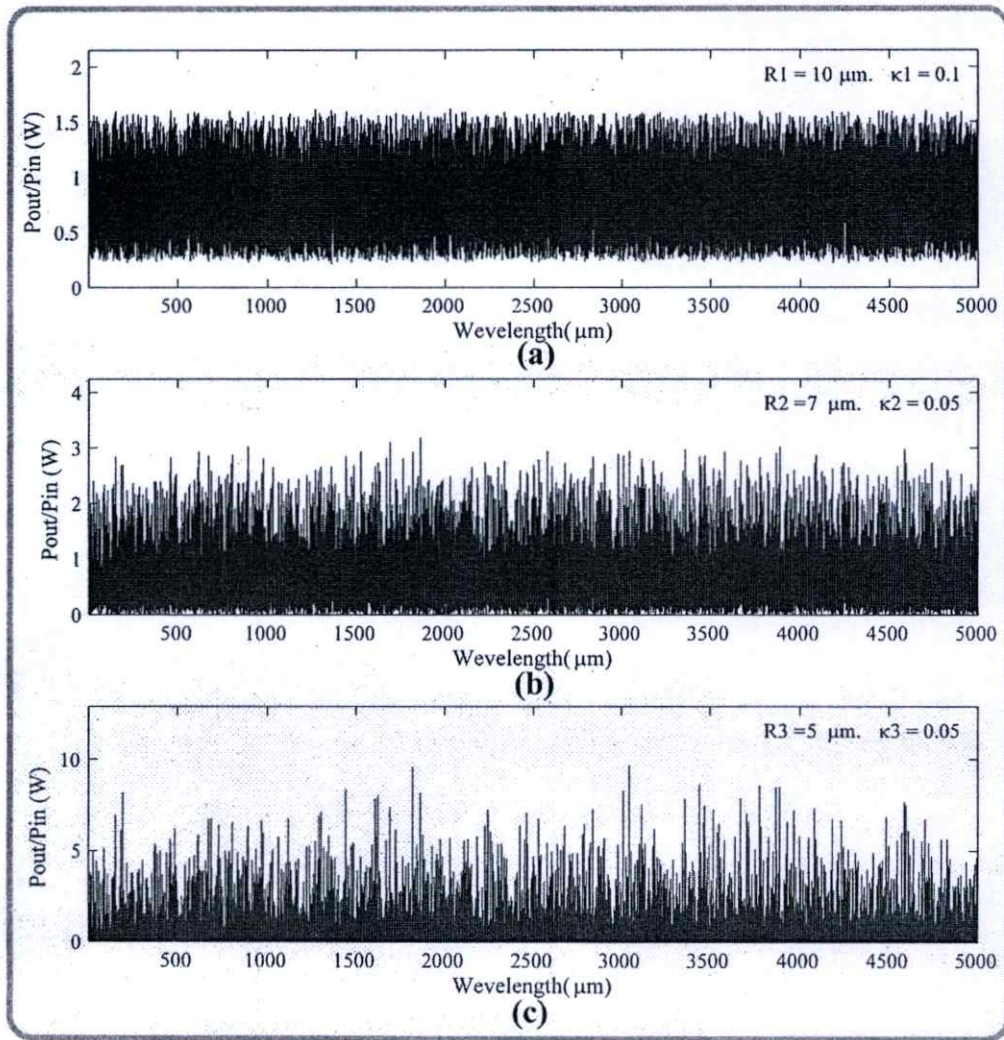
รูปที่ 4.2 แสดงสัญญาณเคออสเมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี R_1 , R_2 และ R_3 คือ 10, 7 และ 5 ไมครอน ค่าคัปปลิง κ_1 , κ_2 , κ_3 เป็น 0.3, 0.05 และ 0.05

การสร้างแบบจำลองนี้ใช้สัญญาณของพัลส์โซลิตอนโดยให้อินพุทมีกำลัง 650 mW พื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่นแสงจาก $A_{cm1} = 0.50 \mu\text{m}^2$, $A_{cm2} = 0.25 \mu\text{m}^2$ และ $A_{cm3} = 0.10 \mu\text{m}^2$ ตามลำดับ ความยาวคลื่นกลาง (λ_0) คือ 1550 นาโนเมตร โครงสร้างแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี R_1 , R_2 และ R_3 คือ 10, 7 และ 5 ไมโครเมตร ค่าคัปปลิง k_1 , k_2 , k_3 เป็น 0.3, 0.05 และ 0.05 เมื่อสัญญาณเริ่มต้นเป็น 1550 นาโนเมตร จากกราฟการสร้างแบบจำลองแสดงแถบของความยาวคลื่นเกิดขึ้นมากมายเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานให้เหมาะสม โดยระบบที่ได้ยังไม่มีการกรองแถบความคลื่นใดคลื่นหนึ่งเป็นหลักแต่เป็นการศึกษาพฤติกรรมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่น จากกราฟจะเห็นได้ว่าสัญญาณถูกขยายขึ้นจากสัญญาณที่อินพุทเข้าไป

รูป A เมื่อสัญญาณพัลส์โซลิตอนมีกำลัง 650 mW ความยาวคลื่น มีค่าเป็น 1550 นาโนเมตร ผ่านวงแหวนสั้นพ้องขนาดเล็กรัศมี $R_1 = 10$ ไมโครเมตร พื้นที่หน้าตัดแกนท่อนำคลื่น $A_{cm1} = 0.50$ ตารางไมโครเมตร ค่าอัตราการแบ่งกำลังแสง คัปปลิง $K_1 = 0.3$ จะให้กำเนิดสัญญาณความถี่ออกเป็นหลายแถบสัญญาณ แถบสัญญาณคลื่นที่ได้มีแถบสัญญาณที่ขยายกว้าง ซึ่งเป็นผลจากความไม่เป็นเชิงเส้นทางแสงและคุณสมบัติของโซลิตอน กำลังของสัญญาณเอาต์พุตสูงสุดมีค่าประมาณ 2 W

รูป B แสดงแถบสัญญาณที่ได้จากวงแหวนที่หนึ่ง ซึ่งจะถูกรองสัญญาณด้วยวงแหวนสั้นพ้องขนาดเล็กวงที่สองรัศมี $R_2 = 7$ ไมโครเมตร พื้นที่หน้าตัดแกนท่อนำคลื่น $A_{cm2} = 0.25$ ตารางไมโครเมตร ค่าอัตราการแบ่งกำลังแสง $K_2 = 0.05$ กำลังของสัญญาณเอาต์พุตสูงสุดมีค่าประมาณ 6 W

รูป C แสดงแถบสัญญาณที่ได้จากวงแหวนที่สอง ซึ่งจะถูกรองสัญญาณด้วยวงแหวนสั้นพ้องขนาดเล็กวงที่สามรัศมี $R_3 = 5$ ไมโครเมตร พื้นที่หน้าตัดแกนท่อนำคลื่น $A_{cm3} = 0.10$ ตารางไมโครเมตร ค่าอัตราการแบ่งกำลังแสง $K_3 = 0.05$ กำลังของสัญญาณเอาต์พุตสูงสุดมีค่าประมาณ 50 W



รูปที่ 4.3 แสดงสัญญาณเคออสเมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั้นห้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกัน มีรัศมี R_1 , R_2 และ R_3 คือ 10, 7 และ 5 ไมครอน ค่าคัปปลิง κ_1 , κ_2 , κ_3 เป็น 0.1, 0.05 และ 0.05

การสร้างแบบจำลองนี้ใช้สัญญาณของพัลส์โซลิตอนโดยให้อินพุตมีกำลัง 650 mW พื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่นแสงจาก $A_{em1} = 0.50 \mu\text{m}^2$, $A_{em2} = 0.25 \mu\text{m}^2$ และ $A_{em3} = 0.10 \mu\text{m}^2$ ตามลำดับ ความยาวคลื่นกลาง (λ_0) คือ 1550 นาโนเมตร โพรงสั้นห้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี R_1 , R_2 และ R_3 คือ 10, 7 และ 5 ไมครอน ค่าคัปปลิง κ_1 , κ_2 , κ_3 เป็น 0.1, 0.05 และ 0.05 เมื่อสัญญาณเริ่มต้นเป็น 1550 นาโนเมตร จากกราฟของสร้างแบบจำลองแสดงแถบของความยาวคลื่นเกิดขึ้นมากมายเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานให้เหมาะสม โดยระบบที่ได้ยังไม่มีการกรองแถบความคลื่นใดคลื่นหนึ่งเป็นหลักแต่เป็นการศึกษาพฤติกรรมเมื่อ

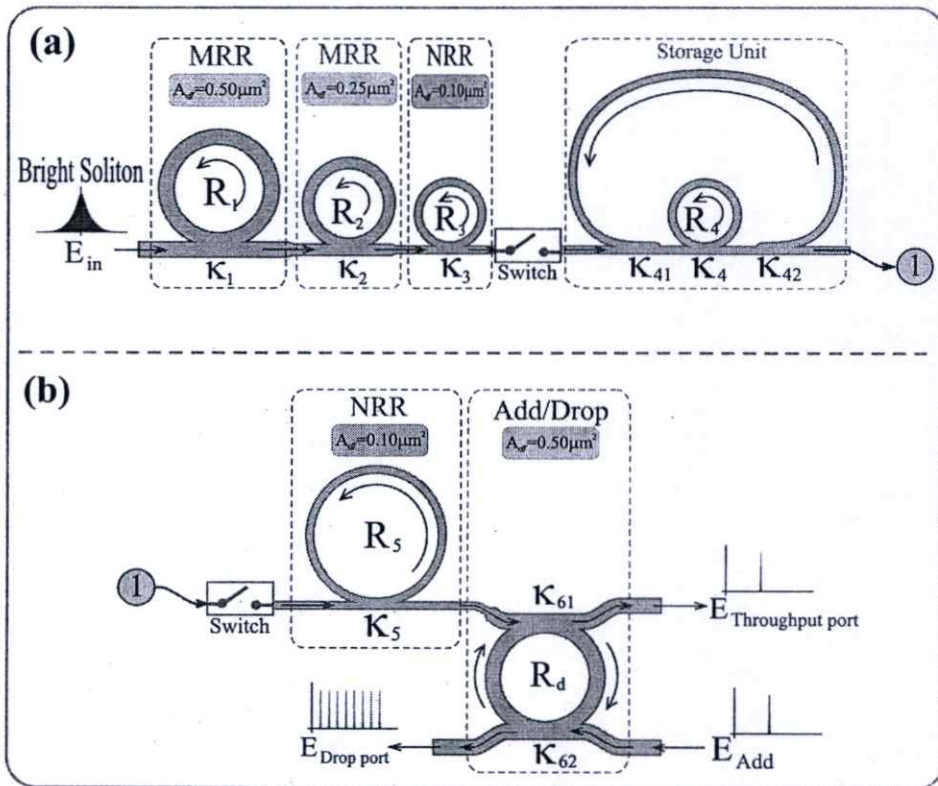
มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่น จากกราฟจะเห็นได้ว่าสัญญาณถูกขยายขึ้นจากสัญญาณที่อินพุตเข้าไป

รูป a เมื่อสัญญาณพัลส์โซลิตอนมีกำลัง 650 mW ความยาวคลื่น มีค่าเป็น 1550 นาโนเมตรผ่านวงแหวนสั่นพ้องขนาดเล็กรัศมี $R_1 = 10$ ไมโครเมตร พื้นที่หน้าตัดแกนท่อนำคลื่น $A_{em} = 0.50$ ตารางไมโครเมตร ค่าอัตราการแบ่งกำลังแสง คัปปลิง $K_1 = 0.1$ จะให้กำเนิดสัญญาณความถี่ออกเป็นหลายแถบสัญญาณ แถบสัญญาณคลื่นที่ได้มีแถบสัญญาณที่ขยายกว้าง ซึ่งเป็นผลจากความไม่เป็นเชิงเส้นทางแสงและคุณสมบัติของโซลิตอน กำลังของสัญญาณเอาต์พุตถูกขยาย ขึ้นจากสัญญาณอินพุต สูงสุดมีค่าประมาณ 1.5 W

รูป b แสดงแถบสัญญาณที่ได้จากวงแหวนที่หนึ่ง ซึ่งจะถูกรองสัญญาณด้วยวงแหวนสั่นพ้องขนาดเล็กรัศมี $R_2 = 7$ ไมโครเมตร พื้นที่หน้าตัดแกนท่อนำคลื่น $A_{em} = 0.25$ ตารางไมโครเมตร ค่าอัตราการแบ่งกำลังแสง $K_2 = 0.05$ กำลังของสัญญาณเอาต์พุตถูกขยาย ขึ้นจากสัญญาณอินพุต สูงสุดมีค่าประมาณ 3 W

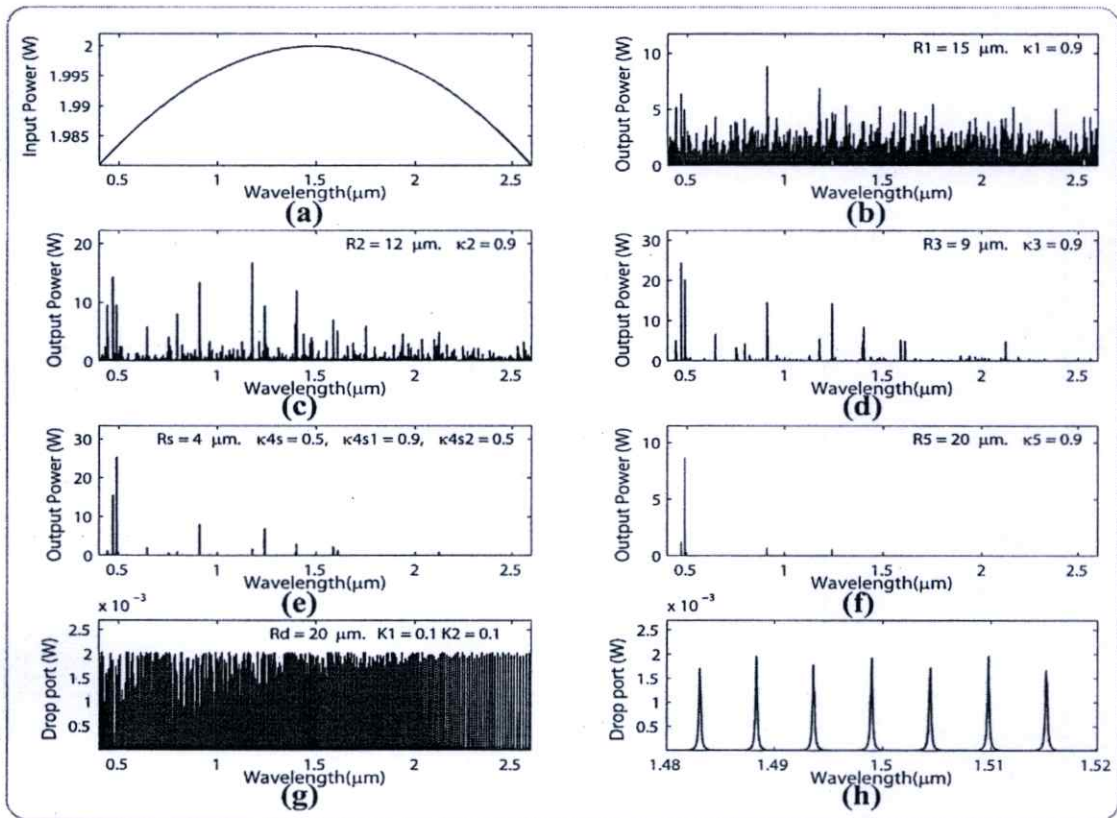
รูป c แสดงแถบสัญญาณที่ได้จากวงแหวนที่สอง ซึ่งจะถูกรองสัญญาณด้วยวงแหวนสั่นพ้องขนาดเล็กรัศมี $R_3 = 5$ ไมโครเมตร พื้นที่หน้าตัดแกนท่อนำคลื่น $A_{em} = 0.10$ ตารางไมโครเมตร ค่าอัตราการแบ่งกำลังแสง $K_3 = 0.05$ กำลังของสัญญาณเอาต์พุตถูกขยาย ขึ้นจากสัญญาณอินพุต สูงสุดมีค่าประมาณ 10 W

4.2 การสร้างแถบสัญญาณที่กว้างซึ่งใช้สัญญาณอินพุตเป็นโซลิตอน โดยหน่วยเก็บ สัญญาณแสง และตัวกรองสัญญาณ แอครอป ซึ่งเป็นวงแหวนขนาดเล็กระดับนาโนเมตร



รูปที่ 4.4 แบบจำลองการกรองของโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กเมื่ออินพุตเป็น โซลิตอนสำหรับโพรงสั้นพ้องระดับนาโนเมตร

การจำลองผลของดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้น GaInAsP/InP (n_2) ของแกนท่อนำคลื่นแสงชนิดโหมคเดียวมีค่าอยู่ที่ $2.2 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{W}$ ที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กชนิดโหมคเดียว โดยกำหนดให้การเปลี่ยนเฟสแบบเชิงเส้นคงที่ ($\phi_L = 0$) รัศมีของวงแหวน 10 - 30 μm อัตราส่วนการคัปปลิงกำลังแสง (κ) เป็น 0.001 - 0.99 พื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่นแสง (A_{eff}) เป็น 0.10 - 0.50 μm^2 สัญญาณเป็นพัลส์โซลิตอนโดยให้อินพุตมีกำลัง (P_{in}) เป็น 650 mW และ ความยาวคลื่นกลาง (λ_0) คือ 1550 นาโนเมตร โดยแผนผังในการทำงานวิจัยสำหรับการสร้างแถบความยาวคลื่นแบบต่อเนื่องจากการกรองโดยใช้โพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.5 รูปแสดงการเกิดแถบสัญญาณที่กว้าง เมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี R_1 , R_2 และ R_3 คือ 10, 7 และ 5 μm ค่าคัปปลิง κ_1 , κ_2 , κ_3 เป็น 0.9, 0.9 และ 0.9 หน่วยเก็บสัญญาณแสงรัศมี R_4 คือ 4 μm ค่าคัปปลิง κ_{4s} , κ_{4s1} , κ_{4s2} เป็น 0.4, 0.9 และ 0.5 R_5 เป็น 20 μm ค่าคัปปลิง κ_5 เป็น 0.9 โพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก แอดดรอป รัศมี R_d เป็น 20 μm ค่าคัปปลิง κ_1 , κ_2 เป็น 0.1, 0.1

การสร้างแบบจำลองนี้ใช้สัญญาณของพัลส์โซลิตอนโดยให้อินพุตมีกำลัง 650 mW พื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่นแสงจาก $A_{\text{eff}1} = 0.50 \mu\text{m}^2$, $A_{\text{eff}2} = 0.25 \mu\text{m}^2$ และ $A_{\text{eff}3} = 0.10 \mu\text{m}^2$ ตามลำดับ ความยาวคลื่นกลาง (λ_0) คือ 1550 นาโนเมตร โพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี R_1 , R_2 และ R_3 คือ 15, 12 และ 9 μm ค่าคัปปลิง κ_1 , κ_2 , κ_3 เป็น 0.9, 0.9 และ 0.9 เมื่อสัญญาณเริ่มต้นเป็น 1550 นาโนเมตร จากกราฟของสร้างแบบจำลอง แสดงแถบของความยาวคลื่นเกิดขึ้นมากมายเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานให้เหมาะสม โดยระบบที่ได้ยังมีกรรกรองแถบความถี่ใดคลื่นหนึ่งเป็นหลักเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่น จากกราฟจะเห็นได้ว่าสัญญาณถูกรองจากสัญญาณที่อินพุตเข้าไปซึ่งจะถูกเก็บภายในหน่วยเก็บสัญญาณรัศมี R_4 คือ 4 μm ค่าคัปปลิง κ_{4s} , κ_{4s1} , κ_{4s2} เป็น 0.5, 0.9 และ 0.5 และจะถูกกรองอีกครั้ง โพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กมีรัศมี R_5 เป็น 20 μm ค่าคัปปลิง κ_5 เป็น 0.9 สัญญาณที่ถูกเก็บไว้สามารถ

ให้กำเนิดแถบสัญญาณที่กว้างได้อีกโดยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก แอดครอป รัศมี R_d เป็น $20 \mu\text{m}$ ค่าคัปปลิง k_1, k_2 เป็น $0.1, 0.1$

รูป a สัญญาณพัลส์โซลิตอนมีกำลัง 650 mW ความยาวคลื่น มีค่าเป็น 1550 นาโนเมตร

รูป b เมื่อสัญญาณพัลส์โซลิตอนผ่านวงแหวนสั้นพ้องขนาดเล็กรัศมี $R_1 = 15 \text{ ไมโครเมตร}$ พื้นที่หน้าตัดแกนท่อนำคลื่น $A_{em} = 0.5 \text{ ตารางไมโครเมตร}$ ค่าอัตราการแบ่งกำลังแสง $K_1 = 0.9$ จะให้กำเนิดสัญญาณความถี่ออกเป็นหลายแถบสัญญาณ แถบสัญญาณคลื่นที่ได้เป็นแถบสัญญาณที่ขยายกว้าง ซึ่งเป็นผลจากความไม่เป็นเชิงเส้นทางแสงและคุณสมบัติของโซลิตอน กำลังของสัญญาณเอาต์พุตถูกขยายขึ้นจากสัญญาณอินพุต สูงสุดมีค่าประมาณ 10 W

รูป c แสดงแถบสัญญาณที่ได้จากวงแหวนที่หนึ่ง ซึ่งจะถูกคัดกรองสัญญาณด้วยวงแหวนสั้นพ้องขนาดเล็กวงที่สองรัศมี $R_2 = 12 \text{ ไมโครเมตร}$ พื้นที่หน้าตัดแกนท่อนำคลื่น $A_{em2} = 0.25 \text{ ตารางไมโครเมตร}$ ค่าอัตราการแบ่งกำลังแสง $K_2 = 0.9$ กำลังของสัญญาณเอาต์พุตถูกขยายขึ้นจากสัญญาณอินพุต สูงสุดมีค่าประมาณ 17 W

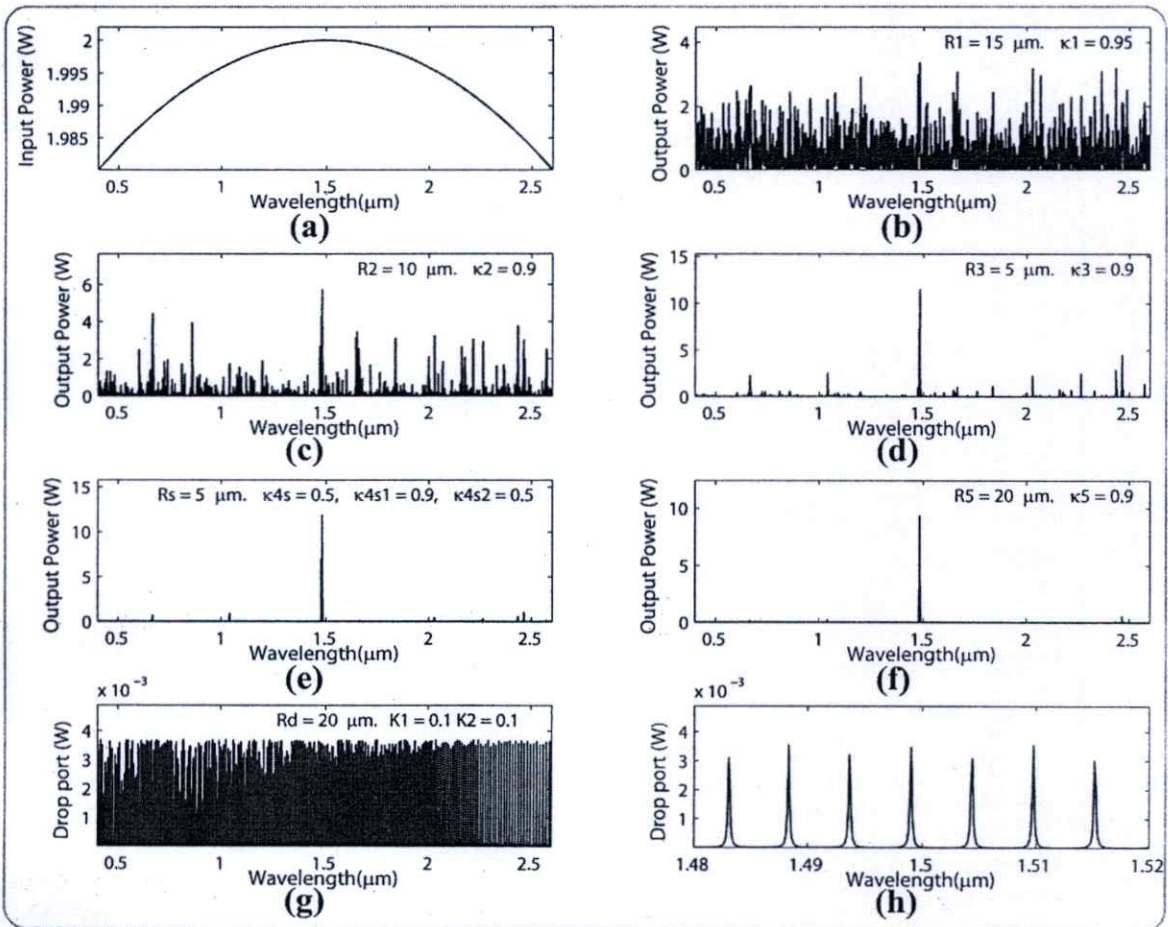
รูป d แสดงแถบสัญญาณ ที่ได้จากวงแหวนที่สอง ซึ่งจะถูกคัดกรองสัญญาณด้วยวงแหวนสั้นพ้องขนาดเล็กวงที่สามรัศมี $R_3 = 9 \text{ ไมโครเมตร}$ พื้นที่หน้าตัดแกนท่อนำคลื่น $A_{em3} = 0.25 \text{ ตารางไมโครเมตร}$ ค่าอัตราการแบ่งกำลังแสง $K_3 = 0.9$ กำลังของสัญญาณเอาต์พุตถูกขยายขึ้นจากสัญญาณอินพุต สูงสุดมีค่าประมาณ 25 W

รูป e แสดงสัญญาณที่ได้จากวงแหวนที่สาม ซึ่งจะถูกคัดกรองสัญญาณและเก็บไว้ภายในหน่วยเก็บสัญญาณด้วยวงแหวนสั้นพ้องขนาดเล็กวงที่สี่ รัศมี $R_4 = 4 \text{ ไมโครเมตร}$ ค่าอัตราการแบ่งกำลังแสง $K_4 = 0.5, K_{4s1} = 0.9, K_{4s2} = 0.5$ กำลังของสัญญาณเอาต์พุต สูงสุดมีค่าประมาณ 25 W

รูป f แสดงสัญญาณที่ได้จากหน่วยเก็บสัญญาณวงแหวนสั้นพ้องขนาดเล็กวงที่สี่ ซึ่งจะถูกคัดกรองสัญญาณด้วยวงแหวนสั้นพ้องขนาดเล็กวงที่ห้ารัศมี $R_5 = 20 \text{ ไมโครเมตร}$ ค่าอัตราการแบ่งกำลังแสง $K_5 = 0.9$ กำลังของสัญญาณเอาต์พุต สูงสุดมีค่าประมาณ 9 W

รูป g แสดงแถบสัญญาณที่กว้าง ที่ได้จากสัญญาณวงแหวนสั้นพ้องขนาดเล็กวงที่ห้า ผ่านเข้าสู่วงแหวนสั้นพ้องขนาดเล็กแอดครอป รัศมี $R_d = 20 \text{ ไมโครเมตร}$ ค่าอัตราการแบ่งกำลังแสง $K_1 = 0.1, K_2 = 0.1$ กำลังของสัญญาณเอาต์พุต สูงสุดมีค่าประมาณ 2 W

รูป h แสดงแถบสัญญาณที่กว้าง(ขนาดขยาย) ที่ได้จากสัญญาณวงแหวนสั้นพ้องขนาดเล็กแอดครอป



รูปที่ 4.6 รูปแสดงการเกิดแถบสัญญาณที่กว้าง เมื่อผ่านการกรองด้วยโปรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี R_1 , R_2 และ R_3 คือ 10, 7 และ 5 μm ค่าคัปปลิง κ_1 , κ_2 , κ_3 เป็น 0.95, 0.9 และ 0.9 หน่วยเก็บสัญญาณแสงรัศมี R_4 คือ 5 μm ค่าคัปปลิง κ_{4s} , κ_{4s1} , κ_{4s2} เป็น 0.5, 0.9 และ 0.5 R_5 เป็น 20 μm ค่าคัปปลิง κ_5 เป็น 0.9 โปรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก แอดดรอป รัศมี R_d เป็น 20 μm ค่าคัปปลิง κ_1 , κ_2 เป็น 0.1, 0.1

การสร้างแบบจำลองนี้ใช้สัญญาณของพัลส์โซลิตอนโดยให้อินพุตมีกำลัง 650 mW พื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่นแสงจาก $A_{cm1} = 0.50 \mu\text{m}^2$, $A_{cm2} = 0.25 \mu\text{m}^2$ และ $A_{cm3} = 0.10 \mu\text{m}^2$ ตามลำดับ ความยาวคลื่นกลาง (λ_0) คือ 1550 นาโนเมตร โปรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี R_1 , R_2 และ R_3 คือ 15, 10 และ 5 μm ค่าคัปปลิง κ_1 , κ_2 , κ_3 เป็น 0.95, 0.9 และ 0.9 เมื่อสัญญาณเริ่มต้นเป็น 1550 นาโนเมตร จากกราฟของสร้างแบบจำลอง แสดงแถบของความยาวคลื่นเกิดขึ้นมากมายเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานให้เหมาะสม โดยระบบที่ได้ยังมีการกรองแถบความคลื่นใดคลื่นหนึ่งเป็นหลักเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัด

ของแกนท่อนำคลื่น จากกราฟจะเห็นได้ว่าสัญญาณถูกกรองจากสัญญาณที่อินพุตเข้าไปซึ่งจะถูกเก็บภายในหน่วยเก็บสัญญาณรัศมี R_4 คือ $5\mu\text{m}$ ค่าคัปปลิง K_{4s} , K_{4s1} , K_{4s2} เป็น 0.5, 0.9 และ 0.5 และจะถูกกรองอีกครั้ง โพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กมีรัศมี R_5 เป็น $20\mu\text{m}$ ค่าคัปปลิง K_5 เป็น 0.9 สัญญาณที่ถูกเก็บไว้สามารถให้กำเนิดแถบสัญญาณที่กว้างได้อีกโดยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก แอดครอป รัศมี R_6 เป็น $20\mu\text{m}$ ค่าคัปปลิง K_1 , K_2 เป็น 0.1, 0.1

รูป a สัญญาณพัลส์โซลิตอนมีกำลัง 650 mW ความยาวคลื่น มีค่าเป็น 1550 นาโนเมตร

รูป b เมื่อสัญญาณพัลส์โซลิตอนผ่านวงแหวนสั้นพ้องขนาดเล็กรัศมี $R_1 = 15$ ไมโครเมตร พื้นที่หน้าตัดแกนท่อนำคลื่น $A_{cm} = 0.5$ ตารางไมโครเมตร ค่าอัตราการแบ่งกำลังแสง $K_1 = 0.95$ จะให้กำเนิดสัญญาณความถี่ออกเป็นหลายแถบสัญญาณ แถบสัญญาณคลื่นที่ได้เป็นแถบสัญญาณที่ขยายกว้าง ซึ่งเป็นผลจากความไม่เป็นเชิงเส้นทางแสงและคุณสมบัติของโซลิตอน กำลังของสัญญาณเอาต์พุตถูกขยายขึ้นจากสัญญาณอินพุต สูงสุดมีค่าประมาณ 3 W

รูป c แสดงแถบสัญญาณ ที่ได้จากวงแหวนที่หนึ่งซึ่งจะถูกคัดกรองสัญญาณด้วยวงแหวนสั้นพ้องขนาดเล็กวงที่สองรัศมี $R_2 = 10$ ไมโครเมตร พื้นที่หน้าตัดแกนท่อนำคลื่น $A_{cm2} = 0.25$ ตารางไมโครเมตร ค่าอัตราการแบ่งกำลังแสง $K_2 = 0.9$ กำลังของสัญญาณเอาต์พุตถูกขยายขึ้นจากสัญญาณอินพุต สูงสุดมีค่าประมาณ 6 W

รูป d แสดงแถบสัญญาณ ที่ได้จากวงแหวนที่สองซึ่งจะถูกคัดกรองสัญญาณด้วยวงแหวนสั้นพ้องขนาดเล็กวงที่สามรัศมี $R_3 = 5$ ไมโครเมตร พื้นที่หน้าตัดแกนท่อนำคลื่น $A_{cm3} = 0.10$ ตารางไมโครเมตร ค่าอัตราการแบ่งกำลังแสง $K_2 = 0.9$ กำลังของสัญญาณเอาต์พุตถูกขยายขึ้นจากสัญญาณอินพุต สูงสุดมีค่าประมาณ 12 W

รูป e แสดงสัญญาณ ที่ได้จากวงแหวนที่สามซึ่งจะถูกคัดกรองสัญญาณและเก็บไว้ในหน่วยเก็บสัญญาณด้วยวงแหวนสั้นพ้องขนาดเล็กวงที่สี่ รัศมี $R_4 = 4$ ไมโครเมตร ค่าอัตราการแบ่งกำลังแสง $K_{4s} = 0.5$, $K_{4s1} = 0.9$, $K_{4s2} = 0.5$ กำลังของสัญญาณเอาต์พุต สูงสุดมีค่าประมาณ 12 W

รูป f แสดงสัญญาณ ที่ได้จากหน่วยเก็บสัญญาณวงแหวนสั้นพ้องขนาดเล็กวงที่สี่ ซึ่งจะถูกรัดกรองสัญญาณด้วยวงแหวนสั้นพ้องขนาดเล็กวงที่ห้ารัศมี $R_5 = 20$ ไมโครเมตร ค่าอัตราการแบ่งกำลังแสง $K_5 = 0.9$ กำลังของสัญญาณเอาต์พุต สูงสุดมีค่าประมาณ 10 W

รูป g แสดงแถบสัญญาณที่กว้าง ที่ได้จากสัญญาณวงแหวนสั้นพ้องขนาดเล็กวงที่ห้า ผ่านเข้าสู่วงแหวนสั้นพ้องขนาดเล็กแอดครอป รัศมี $R_6 = 20$ ไมโครเมตร ค่าอัตราการแบ่งกำลังแสง $K_1 = 0.1$ $K_2 = 0.1$ กำลังของสัญญาณเอาต์พุต สูงสุดมีค่าประมาณ 3.8 W

รูป h แสดงแถบสัญญาณที่กว้าง(ขนาดขยาย) ที่ได้จากสัญญาณวงแหวนสั้นพ้องขนาดเล็กแอดครอป

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการสร้างแถบสัญญาณที่กว้างซึ่งใช้สัญญาณอินพุตเป็นโซลิตอน โดยอาศัย วงแหวนขนาดเล็กระดับนาโนเมตร

การสร้างแบบจำลองของโพรงสี่เหลี่ยมแบบวงแหวนขนาดเล็กที่มีอินพุตเป็น โซลิตอนพัลส์โดยให้อินพุตมีกำลัง (Pin) เป็น 650 mW , ค่าของพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่นแสง จาก $A_{cm} = 0.50 \mu\text{m}^2$, $A_{cm2} = 0.25 \mu\text{m}^2$ และ $A_{cm3} = 0.10 \mu\text{m}^2$ และ ความยาวคลื่นกลาง (λ_0) คือ 1550 nm แผนผังโพรงสี่เหลี่ยมแบบวงแหวนขนาดเล็กของงานวิจัยสำหรับการสร้างแถบสัญญาณที่กว้าง(แสงขาว) ในการกรองคือโพรงสี่เหลี่ยมแบบวงแหวนขนาดเล็กต่อกันเป็นอนุกรมกันจำนวนสามวงแหวน การสร้างแบบจำลองสำหรับโพรงสี่เหลี่ยมแบบวงแหวนขนาดเล็ก สามารถสรุปผลการสร้างแบบจำลองเป็นทั้ง 2 แบบสำหรับการกรอง

- 1) การกรองด้วยโพรงสี่เหลี่ยมแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี R_1 , R_2 และ R_3 คือ 10, 7 และ 5 μm ค่าคัปปลิง K_1 , K_2 , K_3 เป็น 0.3 , 0.05 และ 0.05 กรองให้เป็นแถบความยาวคลื่นแบบต่อเนื่อง
- 2) การกรองด้วยโพรงสี่เหลี่ยมแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี R_1 , R_2 และ R_3 คือ 10, 7 และ 5 μm ค่าคัปปลิง K_1 , K_2 , K_3 เป็น 0.1 , 0.05 และ 0.05 กรองให้เป็นแถบความยาวคลื่นแบบต่อเนื่อง

จากการสร้างแบบจำลองสำหรับโพรงสี่เหลี่ยมแบบวงแหวนขนาดเล็กที่มีอินพุตเป็น โซลิตอนที่ให้แถบสัญญาณที่กว้าง และ สัญญาณยังมีการขยาย ทำการศึกษา โดยการเปลี่ยนแปลงค่าขนาดรัศมี R ของวงแหวน ค่าอัตราการแบ่งกำลังแสง K และ พื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่นเป็น $A_{cm} = 0.50 \mu\text{m}^2$, $A_{cm2} = 0.25 \mu\text{m}^2$ และ $A_{cm3} = 0.10 \mu\text{m}^2$ เป็นลำดับจะเห็นได้ว่าสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์จะมีขนาดเล็ก จากผลของการสร้างแบบจำลองได้แถบความยาวคลื่นเป็นแบบต่อเนื่อง และ สัญญาณที่ได้เป็นการขยาย แต่สัญญาณที่ได้ยังมีความยาวคลื่นมากมายที่ยังไม่ได้ทำการกรองสัญญาณให้เหลือสัญญาณคลื่นใดคลื่นหนึ่ง ซึ่งจะได้ทำการพัฒนาต่อไปในการประยุกต์ใช้งานในแบบต่างๆ

5.2 สรุปผลการสร้างแถบสัญญาณที่กว้าง ซึ่งใช้สัญญาณอินพุทเป็นโซลิตอน โดยหน่วยเก็บสัญญาณแสงและตัวกรองสัญญาณ แอดดรอป ซึ่งเป็นวงแหวนขนาดเล็กระดับนาโนเมตร

การสร้างแบบจำลองของโปรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่มีอินพุทเป็นโซลิตอนพัลส์โดยให้อินพุทมีกำลัง (Pin) เป็น 650 mW, ค่าของพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่นแสง จาก $A_{em} = 0.50 \mu m^2$, $A_{cm} = 0.25 \mu m^2$ และ $A_{cm} = 0.10 \mu m^2$ และ ความยาวคลื่นกลาง (λ_0) คือ 1550 nm แผนผังโปรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กของทำงานวิจัยสำหรับการสร้างแถบสัญญาณที่กว้าง (แสงขาว) ในการกรองคือโปรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กต่อกันเป็นอนุกรมกันจำนวนสามวงแหวน อีกหนึ่งวงแหวนสำหรับเก็บสัญญาณ และ อีกหนึ่งวงสำหรับนำสัญญาณที่เก็บไว้และให้กำเนิดแถบสัญญาณที่กว้าง (แสงขาว) อีกครั้งการสร้างแบบจำลองสำหรับโปรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก สามารถสรุปผลการสร้างแบบจำลองเป็นทั้ง 2 แบบ

1) การกรองด้วยโปรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี R_1, R_2 และ R_3 คือ 15, 12 และ 9 μm ค่าคัปปลิง K_1, K_2, K_3 เป็น 0.9, 0.9 และ 0.9 กรองให้เหลือสัญญาณคลื่นใดคลื่นหนึ่งสัญญาณที่ได้จะถูกเก็บด้วยโปรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก R_4 คือ 4 μm ค่าคัปปลิง K_{4s}, K_{4s1}, K_{4s2} เป็น 0.5, 0.9 และ 0.5 ผ่านการกรองอีกครั้งโดยวงแหวนสั้นพ้องขนาดเล็กวงที่ห้ารัศมี $R_5 = 20$ ไมโครเมตร ค่าอัตราการแบ่งกำลังแสง $K_5 = 0.9$ และต่อกับโปรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก แอดดรอป รัศมี R_d คือ 20 μm ค่าคัปปลิง K_1, K_2 เป็น 0.1, 0.1 เพื่อให้กำเนิดแถบสัญญาณที่กว้าง

2) การกรองด้วยโปรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี R_1, R_2 และ R_3 คือ 15, 10 และ 5 μm ค่าคัปปลิง K_1, K_2, K_3 เป็น 0.95, 0.9 และ 0.9 กรองให้เหลือสัญญาณคลื่นใดคลื่นหนึ่งสัญญาณที่ได้จะถูกเก็บด้วยโปรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก R_4 คือ 5 μm ค่าคัปปลิง K_{4s}, K_{4s1}, K_{4s2} เป็น 0.5, 0.9 และ 0.5 ผ่านการกรองอีกครั้งโดยวงแหวนสั้นพ้องขนาดเล็กวงที่ห้ารัศมี $R_5 = 20$ ไมโครเมตร ค่าอัตราการแบ่งกำลังแสง $K_5 = 0.9$ และต่อกับโปรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก แอดดรอป รัศมี R_d คือ 20 μm ค่าคัปปลิง K_1, K_2 เป็น 0.1, 0.1 เพื่อให้กำเนิดแถบสัญญาณที่กว้าง

จากการสร้างแบบจำลองสำหรับโปรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่มีอินพุทเป็นโซลิตอนให้แถบสัญญาณที่กว้าง และ สัญญาณยังมีการขยาย ทำการศึกษาโดยการเปลี่ยนแปลงค่าขนาดรัศมี R ของวงแหวน ค่าอัตราการแบ่งกำลังแสง K และ ค่าของพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่นเป็น $A_{em} = 0.50 \mu m^2$, $A_{cm} = 0.25 \mu m^2$ และ $A_{cm} = 0.10 \mu m^2$ เป็นลำดับจะเห็นได้ว่าสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์จะมีขนาดเล็ก จากผลของการสร้างแบบจำลองได้แถบความยาวคลื่นเป็นแบบต่อเนื่อง และ สัญญาณที่ได้เป็นการขยาย แต่สัญญาณที่ได้ยังมีความยาวคลื่นมากมาย จากนั้นได้ทำการกรองสัญญาณให้เหลือสัญญาณคลื่นใดคลื่นหนึ่ง ซึ่งจะเก็บ

ไว้หน่วยเก็บสัญญาณซึ่งเป็นโพรงสี่เหลี่ยมแบนวงแหวนขนาดเล็ก และสามารถให้กำเนิดแถบสัญญาณที่กว้าง (แสงขาว) ได้อีกโดย โพรงสี่เหลี่ยมแบนวงแหวนขนาดเล็ก แอครออป

5.3 ผลที่ได้รับจากงานวิจัย

ผลที่ได้รับจากงานวิจัยคือสามารถนำแบบจำลองไปออกแบบสำหรับการสร้างอุปกรณ์ในรูปแบบของโพรงสี่เหลี่ยมแบนวงแหวนเพื่อสร้างสัญญาณ ขยายสัญญาณ เก็บสัญญาณ และให้กำเนิดสัญญาณได้อีกในรูปแบบของความยาวคลื่นแบบต่อเนื่องจากการสร้างแบบจำลองของสัญญาณในรูปแบบของความยาวคลื่นแบบต่อเนื่องสามารถที่จะสร้างแถบของความยาวคลื่นมากมายที่ไม่จำกัด เป็นผลที่เกิดโดยโซลิตอนพัลส์ ใช้ในการสร้างแถบสัญญาณที่กว้าง คือ แสงขาว เพื่อนำไปประยุกต์ในระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ในการให้กำเนิดความร้อนได้

5.4 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

ในการวิจัยนี้เป็นการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB version 2008a เพียงโปรแกรมเดียวโดยไม่ได้จำลองผลโดยใช้โปรแกรมอื่น ๆ ที่มีความเสถียรมากกว่ารวมทั้งเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการจำลองแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจคือใช้เทคนิค FDTD (Finite Differential Time Domain) ในการวิเคราะห์ผลข้อมูลในการจำลองผล โดยเฉพาะโพรงสี่เหลี่ยมแบนวงแหวนระดับนาโนเมตรต้องนำไป Fabricate เพื่อนำมาทดลองผลเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองโดยใช้คอมพิวเตอร์

เอกสารอ้างอิง

- [1] T.A. Ibrahim. "Nonlinear Optical Semiconductor Micro-Ring Resonators." Ph. D. Thesis of University of Maryland. 2003.
- [2] J.H. Marburger and F.S. Felber. "Theory of a lossless nonlinear Fabry-Perot interferometer." *Physical Review A*, vol. 17, no. 1, Jan. 1978. pp. 335-342.
- [3] T.Bischofberger and Y.R. Shen. "Theoretical and experimental study of the dynamic behavior of a nonlinear Fabry-Perot interferometer." *Physical Review A*, vol. 19, no. 3, March 1979. pp. 1169-1176.
- [4] K.Ikeda, H. Daido and O. Akimoto. "Optical turbulence: Chaotic behavior of transmitted light from a ring cavity." *Physics Review Letter*, vol. 45, no. 9, Sept. 1980. pp. 709-712.
- [5] H. Nakatsuka, S. Asaka H. Itoh, K. Ikeda and M. Matusuoka. "Observation of bifurcation to chaos in an all-optical bistable system." *Physics Review Letter*, vol. 50, no. 2, Jan. 1983. pp. 109-112.
- [6] A.L. Steele, S. Lynch and J.E. Hoad. "Analysis of optical instabilities and bistability in a nonlinear optical fiber loop mirror with feedback." *Optics Communications*, vol. 137, April 1997. pp. 136-142.
- [7] Y. Imai and T. Tamura. "Coherence effects on nonlinear dynamics in fiber-optic ring resonator." *Optics Communications*, vol. 195, August 2001. pp. 259 – 265.
- [8] P.P. Yupapin and W. Suwancharoen, "Chaotic Signal Generation and Cancellation using a Micro Ring Resonator Incorporating an Optical Add/Drop Multiplexer," *Opt. Commun.*, 280(2007)343-350.
- [9] P. P. Yupapin and S. Suchat. " Entangle photon generation using fiber optic Mach-Zehnder interferometer incorporating nonlinear effect in a fiber ring resonator " *Nanophotonics*, 1(2007)13504.
- [10] P.P. Yupapin, W. Khunnam and S. Suchat, " The entangled photons generation system using weak light in fiber optic and timing-walk off compensation" , *Int. J. of Quantum Information*, 5(2007)805.
- [11] 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.

- [12] P.P. Yupapin, W. Khunnam and S. Suchat, "The entangled photons generation system using weak light in fiber optic and timing-walk off compensation" , *Int. J. of Quantum Information*, 5(2007)805.
- [13] S. Mitatha, K. Dejhan, P.P. Yupapin and N. Pornsuwancharoen, "Chaotic Signal Generation and Coding using a Nonlinear Micro Ring Resonator" , *International Journal of Light and Electron Optics*, 2008.
- [14] P.P. Yupapin, W. Suwancharoen, "A novel technology for mobile telephone networks and security, *Mobile Telephones: Networks, Applications*" , and *Performance*, Editors: Alvin C. Harper and Raymond V. Bures, Nova Science Publishers : ISBN: 978-1-60456-436-5, 2008.
- [15] P.P. Yupapin and W. Suwancharoen, "Chaotic signal generation and cancellation using a micro ring resonator incorporating an optical add/drop multiplexer" , *Opt. Commun.*, 280(2007)343.
- [16] P.P. Yupapin, P. Phiphithirankarn and S. Suchat, 2007, "A quantum CODEC design via an optical add/drop multiplexer in a fiber optic network" , *Far East Journal of Electronics and Communications*, 1(2007)259.
- [17] C. Fietz and G. Shvets, "Nonlinear polarization conversion using micro ring resonators" , *Opt. Lett.*, 32(2007)1683-1685.
- [18] S. Suchat. W. Khunnam and P.P. Yupapin, "The Entangled photon states recovery using a fiber ring resonator incorporating an erbium-doped fiber amplifier" , *Opt. Eng.*, 47(6), 2008.[Article in press]
- [19] Z. Yang, P. Chak, A. D. Bristow, and H. M. van Driel, "Enhanced second-harmonic generation in AlGaAs micro ring resonators" , *Opt. Lett.* , 32(2007)826.
- [20] G.P. Agrawal. "Nonlinear Fiber Optics, 3rd ED." San Diego: Academic Press, 2001.
- [21] G.P. Agrawal. "Applications of Nonlinear Fiber Optics," San Diego: Academic Press, 2001.
- [22] M. Fox. "Quantum Optics." New York : Academic Press, 2006.
- [23] J.A. Buck. "Fundamentals of Optical Fibers, 2nd ED." New Jersey: Academic Press, 2004.
- [24] D. Goldstein. "Polarized Light 2nd ED." New York : Academic Press, 1993
- [25] C. Sripakdee, K. Sarpat, W. Suwancharoen and P.P. Yupapin, "Entangled photon generation in a nonlinear micro ring resonator for quantum key distribution use," *Proc. in SmarMat-08 & IWOFM-2*, Chiang Mai, 2008
- [26] K. Okamoto. "Fundamentals of Optical Waveguides, 2nd ED." San Diego: Academic Press, 2006.
- [27] L.F. Mollenauer and J.P. Gordon. "Solitons in Optical Fibers." San Diego: Academic Press, 2006.

- [28] Y. Su, F. Liu and Q. Li, "System performance of show-light buffering and storage in silicon nanowaveguide," Proc. SPIE, 6783, 67832P(2007).
- [29] C. Sripakdee, K. Sarpat, W. Suwancharoen and P.P. Yupapin, "Entangled Photon Generation in a Nonlinear Micro Ring Resonator for Quantum Key Distribution Use," SmarMat-08 & IWOFM-2, Chiang Mai, 2008.
- [30] K. Sarapat, N. Pornsuwancharoen and P.P. Yupapin, "Entangled Photon Generated by Chaotic Signals in Micro Ring Resonators," Proceedings on NCOA-3, Bangkok, 2008.
- [31] K. Sarapat, N. Pornsuwancharoen, and P.P. Yupapin, "Polarization soliton pulses generation using nonlinear micro ring resonators for multi and long distance links," International Journal of Light and Electron Optics, 2008. DOI : 10.1016/j.ijleo.2008.09.008 (Impact Factor:2007:0.383)

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้น (n_2)

เนื่องจากส่วนไม่เป็นเชิงเส้นของดัชนีหักเห $\delta n_{NL} = n_2 |E|^2$ ในสมการ (2.9)

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

ครอบคลุมจำนวนปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นทั้งหมดในใยแก้วนำแสง ความเที่ยงตรงในการวัดสัมประสิทธิ์ดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้น n_2 เป็นสิ่งที่จำเป็น แต่อย่างไรก็ตามก่อนที่จะอธิบายการวัดค่า n_2 ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการอธิบายหน่วยที่ใช้แทนค่าตัวเลข

หน่วยในระบบเมตริกซ์มาตรฐาน SI นั้นสนามไฟฟ้ามีหน่วยเป็น V/m δn_{NL} ไม่มีหน่วย หน่วยของ n_2 คือ m^2/V^2 ($1.3913 \times 10^2 \text{ m}^2/\text{W}$) โดยเฉพาะอย่างยิ่งปกติแล้วดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้นจะเขียนอยู่ในรูปแบบของ $\delta n_{NL} = n_2^I I$ เมื่อ I คือ ความเข้มแสงและสัมพันธ์กับ E ดังนี้

$$I = \frac{1}{2} \epsilon_0 c n |E|^2 \quad (\text{ก-1})$$

เมื่อ ϵ_0 คือ สภาพยอมได้ของสุญญากาศ ($\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \text{ F/m}$)

c คือ ความเร็วแสงในสุญญากาศ ($c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$)

และ n คือ ดัชนีหักเหเชิงเส้น ($n \approx 1.45$ สำหรับใยแก้วซิลิกา)

พารามิเตอร์ n_2^I มีหน่วยเป็น m^2/W และสัมพันธ์กับ n_2 เป็น

$$n_2^I = \frac{2n_2}{\epsilon_0 c n} \quad (\text{ก-2})$$

ปกติแล้ว n_2 มีหน่วยเป็น m^2/W สมการที่ (ก-2) แสดงแฟคเตอร์การแปลงกลับเฉพาะในการวัดค่า n_2 ง่ายๆ บางครั้งใช้หน่วยไฟฟ้าสถิต คือ esu เราสามารถแปลงจากหน่วย esu ไปเป็นหน่วย SI โดยใช้ความสัมพันธ์

$$n_2^i = \left(\frac{80\pi}{cn}\right)n_2(esu)5.78 \times 10^{-7} n_2(esu) \quad (ก-3)$$

โดยที่ $n = 1.45$ สำหรับใยแก้วซิลิกา

การวัดค่า n_2 สำหรับ bulk silica glasses จะได้ค่า $n_2 = 2.7 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ ที่ความยาวคลื่น $1.06 \mu\text{m}$ ค่านี้จะลดลงโดยประมาณ 3 – 4% สำหรับความยาวคลื่นใกล้ $1.5 \mu\text{m}$ การวัดค่า n_2 ที่ง่ายสุดในใยแก้วซิลิกาในปี ค.ศ. 1978 โดยใช้พัลส์แสงที่มีสเปกตรัมกว้าง 90 ns (หาได้จากเลเซอร์อาร์กอน-ไอออนที่ความยาวคลื่น 515 nm) ที่เกิดจาก self-phase modulation (SPM) ได้ค่าประมาณ $3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ จากการทดลองและค่านี้ถูกนำไปใช้ศึกษาปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในใยแก้วนำแสงมากที่สุด แม้ว่าในความเป็นจริงแล้วค่า n_2 โดยปกติจะเปลี่ยนแปลงจากใยแก้วต่อใยแก้ว (fiber to fiber)

สิ่งสำคัญที่เกิดขึ้นในปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น ในระบบการสื่อสารเชิงแสงกลับได้รับความสนใจอีกครั้งในการวัดค่า n_2 ระหว่างปี ค.ศ. 1990 โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมผลิตใยแก้วต้องการค่า n_2 เฉพาะสำหรับแต่ละชนิดใยแก้วนำแสง เทคนิคที่แตกต่างหลายเทคนิคที่ใช้ในการวัดค่า n_2 สำหรับใยแก้วนำแสงหลายชนิด ค่าที่วัดได้พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง $2.2 - 3.4 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ จุดเริ่มต้นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นช่วงกว้างๆ ในค่า n_2 สำหรับใยแก้วนำแสงนั้นคือ การเจือแกนใยแก้วนำแสงด้วยวัสดุอื่น เช่น GeO_2 และ Al_2O_3 สารเจือเหล่านี้ทำให้วัดค่า n_2 ได้ค่าที่แตกต่างกันสำหรับการผลิตใยแก้วนำแสงชนิด dispersion-shifted ทั้งหมดโดยใช้ปริมาณที่แตกต่างในการเจือภายในแกนใยแก้วนำแสง นอกจากนี้แล้วใยแก้วนำแสงจะไม่รักษาสถานะโพลาไรเซชันระหว่างการเดินทางของแสงในใยแก้วนำแสงด้วย สถานะโพลาไรเซชันจะเปลี่ยนแปลงแบบสุ่มตลอดความยาวใยแก้วนำแสง การวัดค่าเฉลี่ย n_2 ที่ลดลงโดยแฟกเตอร์ 8/9 เทียบกับค่าที่ได้สำหรับ bulk samples ที่รักษาสถานะโพลาไรเซชันของแสงที่ตกกระทบ

การวัดค่า n_2 ที่เกิดจากเทคนิคการทดลองที่ใช้ในการวัดค่า n_2 เหตุผลคือ มีคุณสมบัติเชิงกลอื่นๆ 2 คุณสมบัติที่สอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของโมเลกุล (Raman effect) และการกระตุ้นด้วยคลื่นเสียงตลอด electrostrictive (Brillouin scattering) ที่ทำให้เกิดค่า n_2 แต่อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์นี้ขึ้นอยู่กับความกว้างของพัลส์ที่ยาวกว่าหรือสั้นกว่า เวลาการตอบสนองที่สัมพันธ์กับ กระบวนการที่สอดคล้อง electrostrictive ที่เกิดขึ้นจะหายไปสำหรับพัลส์ที่สั้นกว่า 100 ps แต่จะเป็นค่าสูงสุด (~ 16% ของ n_2 ทั้งหมด) สำหรับพัลส์ที่มีความกว้าง > 10 ns ในการเปรียบเทียบผลของรามานที่เกิดขึ้นจะไม่หายไปจนกระทั่งพัลส์มีความกว้าง < 50 fs และ ~ 18% สำหรับพัลส์ที่กว้าง > 10 ps ใช้ในการเปรียบเทียบพัลส์ที่มีความกว้างต่างกัน ค่ามากที่สุดของค่า n_2 ที่คาดหวังสำหรับการวัดภายใต้เงื่อนไข quasi-CW โดยใช้พัลส์กว้าง > 10 ns

ความแตกต่างของปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นทั้งหลายที่ใช้วัดค่า n_2 สำหรับใยแก้วซิลิกา คือ ประกอบด้วย SPM, XPM, FWM และ modulation instability

เทคนิค SPM ใช้อย่างกว้างขวาง ในเซต 1 เซตของการวัดพัลส์ mode-locked ที่อยู่ระหว่าง 110 ps หาได้จากเลเซอร์ Nd:YAG ที่ความยาวคลื่น 1.319 μm สำหรับแกนของใยแก้วซิลิกา (ไม่มีการเจือสารใดๆ) การวัดค่า n_2 ได้ $2.36 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ แต่การวัดค่า n_2 ในใยแก้วชนิด DSFs ได้ค่าเฉลี่ย $2.62 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ เพราะว่ามีสารเจือที่แกนของใยแก้วชนิด DSFs การวัดค่า n_2 ที่ช่วงความยาวคลื่น 1.55 μm บางครั้งวัดค่าได้น้อยกว่า

ลักษณะของการเกิดกระบวนการแบบไม่เป็นเชิงเส้นในตัวกลาง คือ ผลคูณของ IL_{eff} เมื่อ I คือ ความเข้มแสง และ L_{eff} คือ ความยาวยังผลของบริเวณปฏิกริยา ถ้าแสงมีรัศมีโฟกัส spot เป็น w_0 ดังนั้น $I = P/\pi w_0^2$ เมื่อ P คือ กำลังความเข้มแสง นั่นคือ I จะเพิ่มขึ้นโดยที่รัศมีโฟกัสแสง w_0 ลดลง แต่อย่างไรก็ตามผลนี้ค่า L_{eff} น้อยกว่าเนื่องจากว่าความยาวของบริเวณโฟกัสลดลงด้วยการปรับโฟกัส สำหรับลำแสงแบบเกาส์เซียน $L_{eff} \pi w_0^2 / \lambda$ และผลคูณ

$$IL_{eff} = \frac{P}{\pi w_0^2} \cdot \frac{\pi w_0^2}{\lambda} = \frac{P}{\lambda} \quad (\text{ก-4})$$

จากสมการ (ก-4) จะเห็นได้ว่าจะไม่ขึ้นกับ w_0 ในใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว w_0 เป็นการกำหนดโดยรัศมีของแกน (a) เพราะว่าท่อนำคลื่นสารไดอิเล็กทริกจะมี w_0 ตลอดความยาว L ของใยแก้ว ในกรณีความยาวปฏิกริยา (interaction length) L_{eff} เป็นการจำกัดโดยการสูญเสียของใยแก้วนำแสง (α) โดยใช้ $I(z) = I_0 \exp(-\alpha z)$ เมื่อ $I_0 = P/\pi w_0^2$ และ P คือกำลังแสงที่รวมอยู่ในใยแก้ว ผลคูณของ IL_{eff} จะกลายเป็น

$$IL_{eff} = \int_0^L \frac{P}{\pi w_0^2} \exp(-\alpha z) dz = \frac{P}{\pi w_0^2} \left[\frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha} \right] \quad (\text{ก-5})$$

เปรียบเทียบสมการที่ (ก-4) และ (ก-5) แสดงว่าประสิทธิภาพ (efficiency) ของกระบวนการแบบไม่เป็นเชิงเส้นในใยแก้วนำแสงสามารถปรับปรุงโดยแฟคเตอร์

$$\frac{(IL_{eff})_{fiber}}{(IL_{eff})_{bulk}} = \frac{\lambda}{\pi w_0^2 \alpha} \quad (\text{ก-6})$$

เมื่อ αL_1 เป็นการสมมติในช่วงวิสิเบิล (visible) สำหรับ $\lambda = 0.53 \mu\text{m}$, $w_0 = 2 \mu\text{m}$ และ $\alpha = 2.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ (10 dB/km) enhancement factor $\sim 10^7$ และ enhancement จะมีค่า $\sim 10^9$ ที่ความยาวคลื่นที่เกิดการสูญเสียต่ำสุดที่ใกล้ๆ 1.55 ไมโครเมตร เมื่อ $\alpha = 5 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-1}$ (0.2 dB/km) นี้คือ enhancement มากมายในประสิทธิภาพของกระบวนการแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ทำจากใยแก้วชนิดซิลิกาที่เป็นตัวกลางแบบไม่เป็นเชิงเส้น สำหรับการสังเกตพบปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นช่วงกว้างๆที่สัมพันธ์กับระดับกำลังต่ำ ความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นอย่างอ่อนของซิลิกากลายเป็นประเด็นในการประยุกต์ใช้บางอย่างที่สอดคล้องกับสวิตชิงแสงที่เป็นไปได้โดยใช้ใยแก้วนำแสงเป็นวัสดุแบบไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับที่มีค่าดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้นมากกว่าใยแก้วชนิดซิลิกา ใยแก้วนำแสงที่ผลิตจากซิลิกาจะมีค่าดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้นมากกว่าประมาณแฟคเตอร์ของ 10 ค่าที่มากที่สุด ($n_2 = 4.2 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$) ที่วัดได้ในใยแก้วชนิด chalcogenide-glass

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นาย อาทิตย์ วรรณกุล
วัน เดือน ปีเกิด	4 ธันวาคม 2520
สถานที่เกิด	อ.นางรอง จ.บุรีรัมย์
ที่อยู่	105 หมู่ 3 ต.นางรอง อ.นางรอง จ.บุรีรัมย์
ประวัติการศึกษา	เข้ารับการศึกษาระดับปริญญาตรีเมื่อ 2539 จบการศึกษาระดับปริญญาตรีเมื่อ 2544 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง จากนั้นได้เข้ารับการศึกษา ระดับปริญญาโทเมื่อ 2547 จบการศึกษา ระดับปริญญาโทเมื่อ 2552 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง