

การสร้างควมยาวคลื่นต่อเนื่องด้วยโซลิตอนพัลส์ในโพรงสั่นพ้องขนาดเล็กแบบไม่  
เป็นเชิงเส้นสำหรับการใช้งานในสารสนเทศเชิงควอนตัม

CONTINUOUS WAVELENGTH GENERATION USING A SOLITON PULSE WITHIN  
A NONLINEAR MICRO RING RESONATOR FOR QUANTUM  
INFORMATION APPLICATIONS

กันต์ทอง สารพัลน์  
KHUNTHONG SARAPAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009 SC-M-030-002

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

**การสร้างควมยาวคลื่นต่อเนื่องด้วยโซลิตอนพัลส์ในโพรงสั้นพ้องขนาดเล็กแบบไม่  
เป็นเชิงเส้นสำหรับการใช้งานในสารสนเทศเชิงควอนตัม**

**CONTINUOUS WAVELENGTH GENERATION USING A SOLITON PULSE WITHIN  
A NONLINEAR MICRO RING RESONATOR FOR QUANTUM  
INFORMATION APPLICATIONS**



**จันทร์ทอง สารพัฒน์**

**KHUNTHONG SARAPAT**

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....**95059**  
วัน,เดือน,ปี.....**20 พ.ค. 2552**

**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต**

**สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์**

**คณะวิทยาศาสตร์**

**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

**พ.ศ. 2552**

**KMITL-2009-SC-M-030-002**

**CONTINUOUS WAVELENGTH GENERATION USING A SOLITON PULSE WITHIN  
A NONLINEAR MICRO RING RESONATOR FOR QUANTUM  
INFORMATION APPLICATIONS**

**KHUNTHONG SARAPAT**

**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-030-002**

**COPYRIGHT 2009**




**FACULTY OF SCIENCE**

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

คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสร้างความยาวคลื่นต่อเนื่องด้วยพัลส์โซลิตอนในโพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็กแบบไม่  
เป็นเชิงเส้นสำหรับการใช้งานสารสนเทศเชิงควอนตัม  
Continuous Wavelength Generation Using a Soliton Pulse Within a Nonlinear Micro Ring  
Resonator for Quantum Information Applications

นักศึกษา นายจันทร์ทอง สารพัฒน์  
รหัสประจำตัว 50067303  
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ปรีชา ยูพาพิน

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง	
รศ.ดร.ปรีชา ยูพาพิน	
รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ	
ดร.นิธิโรจน์ พรสุวรรณเจริญ	

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 30 มกราคม 2552 เวลา 09.00 น. เป็นต้นไป

สถานที่สอบ ณ อาคารจุฬาภรณ์วลัยลักษณ์ 1 ห้อง 307

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ มงคลอัครวัฒน์)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่.....11.....เดือน.....กุมภาพันธ์.....พ.ศ.....๒๕๕๒.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสร้างความยาวคลื่นต่อเนื่องด้วยพัลส์โซลิตอนในโพรงสั้นพ้องวง แหวนขนาดเล็กแบบไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับการใช้งานสารสนเทศ เชิงควอนตัม
นักศึกษา	นายจันทร์ทอง สารพัฒน์
รหัสประจำตัว	50067303
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. ปรีชา ยูพาพิน

### บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการสร้างความยาวคลื่นต่อเนื่องด้วยโซลิตอนพัลส์ในโพรงสั้นพ้องขนาดเล็กแบบไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับการใช้งานสารสนเทศเชิงควอนตัม การใช้งานในการเข้ารหัสเชิงควอนตัมสามารถใช้ในรูปของความถี่ของสัญญาณโดยอาศัยประโยชน์ที่ได้จากการประมวลผลสัญญาณ เคออส ในการกรองสัญญาณความถี่ที่ต้องการเลือกและนำไปใช้งาน นอกจากนี้ การสร้างความยาวคลื่นต่อเนื่องในการเข้ารหัสเชิงควอนตัมโดยอาศัยคุณสมบัติของกลุ่มความสัมพันธ์ของโฟตอน เมื่อเริ่มต้นรหัสถูกสร้างโดยผู้ส่งแล้วรหัสถูกอ่านโดยผู้รับที่ใช้ในเครือข่ายโทรศัพท์ด้วยวิธีการผสมกันของใยแก้วกับแบบไร้สายสามารถเชื่อมต่อกันได้เป็นผลสำเร็จ ยังเสนอแนวคิดที่สามารถใช้การเลียนแบบสถานะกลุ่มความสัมพันธ์ของโฟตอนในระบบของใยแก้วนำแสง ใช้โพรงสั้นพ้องขนาดเล็กแบบไม่เป็นเชิงเส้นวงในการสร้างกลุ่มความสัมพันธ์ของโฟตอนเริ่มต้น เมื่อสามารถสร้างสัญญาณให้เหลือเพียงฮาร์มอนิกที่สองอย่างเดียวโดยอาศัยประโยชน์ที่ได้จากการประมวลผลสัญญาณ เคออส ในท่อนำคลื่นที่เป็นโพรงสั้นพ้องขนาดเล็กแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ต่อกันเป็นอนุกรมทำหน้าที่ในการกรองสัญญาณ การนำไปใช้ในระบบเฉพาะเจาะจงความยาวคลื่นสำหรับฮาร์มอนิกที่สองโดยการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรสำหรับโพรงสั้นพ้องขนาดเล็กแบบไม่เป็นเชิงเส้น สำหรับการแบบสัญญาณที่ได้จากการสร้างโดยใช้แอด/ครีปที่เป็นโพรงสั้นพ้องขนาดเล็กออกจากสัญญาณหลักที่ได้จากการสร้างสามารถควบคุมได้โดยการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิงจากสัญญาณที่ได้จากขั้นตอนของการเลียนแบบสามารถทำการขยายสัญญาณ และการรักษาสภาพโพลาไรซ์สำหรับกลุ่มความสัมพันธ์ของโฟตอน ประโยชน์ที่ได้รับคือสามารถทำการเลียนแบบสถานะของกลุ่มความสัมพันธ์ของโฟตอนสำหรับการใช้งานในสารสนเทศเชิงควอนตัม แล้วยังสามารถนำระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ เพื่อเป็นอุปกรณ์ในการแปลงสัญญาณขาขึ้น-ขาลงเพื่อทำให้เกิดความปลอดภัยสำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ ในระบบการส่งสัญญาณควมเทียมผ่านระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ เป็นช่องทางการสื่อสาร

<b>Thesis Title</b>	<b>Continuous Wavelength Generation Using a Soliton Pulse within a Nonlinear Micro Ring Resonator for Quantum Information Applications</b>
<b>Student</b>	Mr. Khunthong Sarapat
<b>Student ID</b>	50067303
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Program</b>	Applied Physics
<b>Year</b>	2008
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Preecha Yupapin

### **ABSTRACT**

In this thesis, we propose the continuous variable quantum key distribution system can be implemented within the small device call “micro ring resonator”. The quantum key can be performed by using the frequency bands generated by the technique called chaotic filtering scheme, where the required frequency bands can be selected and used. Furthermore, the continuous variable quantum codes can be generated by using the different time slot entangled photon pairs, where the initial codes can be generated by Alice, where the retrieval codes by Bob in the telephone networks via the hybrid optical-wireless link can be performed. We also propose the system that can be possibly used to clone the entangled photon states in the optical transmission link. The use of micro ring devices to generate the initial entangled photon is described, where the clear second harmonic generation is obtained by using the chaotic signals propagating in a series of micro ring resonators. Using this system, the specific wavelength of second harmonic mode is generated by using the appropriate ring parameters. The cloning unit is formed by using the add/drop device and the micro ring device, where the small amount of the transmission power is coupled into the add/drop device and the micro ring device. The entangled state recovery is formed by the nonlinear micro ring device, where the cloning signal is picked up by the amplified and polarization control unit related to the initial entangled state. Results obtained have shown that the cloning of the entangled photon states from the quantum communication link is plausible and valid. Results obtained have shown the good potential of using such a system for mobile telephone up-link and down-link converters in the telephone network with security.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดีด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก รศ.ดร. ปรีชา  
บุพาพิน ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. จูตินัย แก้วแดง, รศ. งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ดร. นิธิโรจน์  
พรสุวรรณเจริญ ซึ่งเป็นผู้ตรวจทานเนื้อหาและให้คำแนะนำตลอดจนชี้แนะแนวทางในการแก้ไข  
ปัญหาที่เกิดขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณชาวห้องแล็บไฟเบอร์ออปติกทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆจน  
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ และบัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้โอกาสในการศึกษาและทำวิจัยจนสำเร็จ  
ลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณทุกคนในครอบครัว เพื่อนๆ นักศึกษา ผู้ร่วมงานที่คอยเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยทำวิจัย  
ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ บิดา มารดา  
และผู้มีพระคุณทุกท่าน

จันทร์ทอง สารพัฒน์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VII
สารบัญรูป .....	VIII
บทที่ 1 ทบทวน .....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	10
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	10
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	12
1.5 วิธีดำเนินการทำการทำวิทยานิพนธ์ .....	12
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	14
2.1 สมการแมกเวลล์ และ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Maxwell's equations and electromagnetic wave) .....	14
2.2 ความไม่เป็นเชิงเส้นทางแสง (Nonlinear Optic) .....	21
2.3 โพลาริเซชันของแสง ( Polarization of light ) .....	27

## สารบัญ ( ต่อ )

	หน้า
2.4 โจนส์เมทริกซ์แคลคูลัส ( The Jones Matrix Calculus ) .....	33
2.5 คู่ความเกี่ยวพันของสถานะโฟตอน ( Entangled Photon State ) .....	43
2.6 โพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็ก (Micro Ring Resonator) .....	49
2.7 พัลส์เกาส์เซียน (Gaussian pulse) และ พัลส์โซลิตอน (Soliton pulse) .....	52
<b>บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>55</b>
3.1 การศึกษาโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ .....	55
3.2 การศึกษาการเกิด SHG สำหรับการกรองของโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก เมื่ออินพุตเป็นพัลส์เกาส์เซียน .....	60
3.3 การศึกษาการเกิด SHG สำหรับการกรองของโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก เมื่ออินพุตเป็นพัลส์โซลิตอน .....	61
3.4 แบบจำลองการสร้างความยาวคลื่นแบบต่อเนื่องโดยอาศัยโพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็กระดับนา โนเมตรอินพุตเป็นพัลส์โซลิตอน .....	62
<b>บทที่ 4 ผลการจำลอง .....</b>	<b>64</b>
4.1 การสร้าง SHG โดยใช้สัญญาณอินพุตเป็นพัลส์เกาส์เซียน .....	64
4.2 การสร้าง SHG โดยใช้สัญญาณอินพุตเป็นพัลส์โซลิตอน .....	70

## สารบัญ ( ต่อ )

	หน้า
4.3 การสร้างแถบความยาวคลื่นแบบต่อเนื่องโดยใช้สัญญาณอินพุตพัลส์โซลิตอน โดยอาศัยวงแหวนขนาดเล็กระดับนาโนเมตร .....	75
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>80</b>
5.1 สรุปผลสำหรับอินพุตเป็นพัลส์เกาส์เซียน .....	80
5.2 สรุปผลสำหรับอินพุตเป็นพัลส์โซลิตอน .....	81
5.3 สรุปผลสำหรับอินพุตเป็นพัลส์โซลิตอนในระดับนาโนเมตร .....	82
5.4 ผลที่ได้รับจากงานวิจัย .....	83
5.5 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาต่อไป .....	83
เอกสารอ้างอิง .....	84
ภาคผนวก .....	87
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ .....	92
ประวัติผู้เขียน .....	93

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงสถานสำหรับ Bells' states .....	49

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แควิตีแบบวงแหวนประกอบด้วยตัวกลางไดอิเล็กตริกแบบไม่เป็นเชิงเส้น ที่ศึกษาโดยอิกเคะและคณะ .....	2
1.2 ชุดทดลองศึกษาไบฟูร์เคชันตลอดจนเคออสในระบบสเปคเทิลทางแสง ที่ใช้ใยแก้วนำแสง-ชนิดโหมคเดี่ยวเป็นตัวกลางแบบไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งเสนอ โดยนากาที่สุกะและคณะ .....	3
1.3 คู่มิเรอร์ใยแก้วนำแสงไม่เป็นเชิงเส้นที่มีการย้อนกลับทางแสงที่เสนอ โดยสตีลและคณะ .....	4
1.4 โมเดลโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงที่มีคัปเปิลเลอร์ใยแก้วนำแสงอันเดียว .....	5
1.5 ไดอะแกรมโครงสร้างของโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนที่รวมในท่อนำคลื่นอันเดียว .....	5
1.6 ไบฟูร์เคชันไดอะแกรมของกำลังแสงเอาท์พุทในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก ที่เปลี่ยนแปลงตามกำลังแสงอินพุท เมื่อ $n_2 = 2.8 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ a) กำลังแสงเอาท์พุทกับจำนวนลูปโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวน b) กำลังแสงเอาท์พุทกับกำลังแสงอินพุท .....	8
1.7 ไดอะแกรมแสดงการสร้างการเกิดโพลาริตอนต่างกันสำหรับการทดลอง .....	9
2.1 แสดงการหักเหของแสงจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหที่ต่างกัน .....	19
2.2 การแพร่ของการสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าของแสง (Electromagnetic wave) .....	20
2.3 (a) แผนผังแสดงการรวมกันของความถี่ และ (b) การแบบกันของความถี่ต้น .....	25
2.4 การโพลาริเซชันของแสงผ่านตัวกรองแสงที่บังคับการสั่นให้เหลือทิศทางเดียว .....	28

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่	หน้า
2.5 องค์ประกอบของโพลาริเซชัน .....	28
2.6 รูปแบบการสั่นของสนามไฟฟ้าในกรณีที่ $\phi = 0$ และ $\phi = \pi$ .....	31
2.7 รูปแบบการสั่นของสนามไฟฟ้าในกรณีที่ $\phi = \frac{\pi}{2}$ และ $\phi = \frac{3\pi}{2}$ .....	31
2.8 รูปแบบการสั่นของสนามไฟฟ้าในกรณีที่ $\phi \neq 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$ .....	32
2.9 แสดงการเกิด Entangled Photon State สำหรับ BBO(beta-barium borate) crystal .....	44
2.10 แผนผังแสดงรูปแบบของการเกิดคู่ความสัมพันธ์ สำหรับ โฟตอนตัวเดียว (single photon entangled ) .....	45
2.11 แผนผังการสร้าง Mach-Zhender โดยใช้ใยแก้วนำแสง .....	45
2.12 แผนผังการเกิดคู่ความสัมพันธ์ของโพลาริเซชันสำหรับการทดลองโดยใช้โพลาริซมิ่งวงแหวน .....	47
2.13 แผนผัง PBS แยกองค์ประกอบของ $ H\rangle$ และ $ V\rangle$ .....	47
2.14 โพรงเส้นพ้องวงแหวนวงเดียว .....	49
2.15 แสดงลักษณะของเกาส์เซียนพัลส์ตามระยะทาง .....	53
แสดงลักษณะของโซลิตอนพัลส์ตามระยะทาง .....	54

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่	หน้า
3.1 โมเดล โครงสร้างป้องกันแบบวงแหวนที่นำคลื่นที่ประกอบด้วยคัปเปิลอร์ .....	55
3.2 แผนผังการสร้าง SHG โดยอาศัยโครงสร้างป้องกันแบบวงแหวนขนาดเล็ก .....	60
3.3 แผนผังการสร้าง SHG โดยอาศัยโครงสร้างป้องกันแบบวงแหวนขนาดเล็ก .....	61
3.4 แผนผังการสร้างแถบความคลื่นแบบต่อเนื่องโดยอาศัยโครงสร้างป้องกันแบบวงแหวนนาโนเมตร .....	63
4.1 แบบจำลองการกรองของโครงสร้างป้องกันแบบวงแหวนขนาดเล็กเมื่ออินพุตเป็นเกาส์เซียน .....	64
4.2 แสดงสัญญาณเคออสเมื่อผ่านการกรองด้วยโครงสร้างป้องกันแบบวงแหวนขนาดเล็ก ที่ต่อแบบอนุกรมกัน มีรัศมี $R_1, R_2, R_3$ และ $R_4$ คือ 17, 13, 14 และ 14 ไมครอน ค่าคัปปลิง $K_1, K_2, K_3, K_4$ เป็น 0.995, 0.9831, 0.985 และ 0.9826 .....	65
4.3 แสดงสัญญาณเคออสเมื่อผ่านการกรองด้วยโครงสร้างป้องกันแบบวงแหวนขนาดเล็ก ที่ต่อแบบอนุกรมกัน มีรัศมี $R_1, R_2, R_3$ และ $R_4$ คือ 17, 10, 11 และ 15 ไมครอน ค่าคัปปลิง $K_1, K_2, K_3, K_4$ เป็น 0.995, 0.985, 0.983 และ 0.9826 .....	66
4.4 แสดงสัญญาณเคออสเมื่อผ่านการกรองด้วยโครงสร้างป้องกันแบบวงแหวนขนาดเล็ก ที่ต่อแบบอนุกรมกัน มีรัศมี $R_1, R_2, R_3$ และ $R_4$ คือ 17, 15, 11 และ 15 ไมครอน ค่าคัปปลิง $K_1, K_2, K_3, K_4$ เป็น 0.995, 0.985, 0.983 และ 0.9838 .....	67
4.5 แสดงสัญญาณเคออสเมื่อผ่านการกรองด้วยโครงสร้างป้องกันแบบวงแหวนขนาดเล็ก ที่ต่อแบบอนุกรมกัน มีรัศมี $R_1, R_2, R_3$ และ $R_4$ คือ 15, 18, 15 และ 10 ไมครอน ค่าคัปปลิง $K_1, K_2, K_3, K_4$ เป็น 0.9895, 0.9858, 0.9858 และ 0.9713 .....	68

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่	หน้า
4.6 แสดงสัญญาณของ H และ V เมื่อ ทำการหมุน Rotatable Polarizer จาก 0 – 180 องศา แบบจำลองการกรองของโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก เมื่ออินพุตเป็นเกาส์เซียน .....	69
4.7 แบบจำลองการกรองของโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก เมื่ออินพุตเป็นเกาส์เซียน .....	70
4.8 แสดงสัญญาณเคออสเมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก ที่ต่อแบบอนุกรมกัน มีรัศมี $R_1, R_2$ และ $R_3$ คือ 12, 12 และ 19 ไมครอน ค่าคัปปลิง $K_1, K_2, K_3$ เป็น 0.9821, 0.9821 และ 0.987.....	71
4.9 แสดงสัญญาณเคออสเมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก ที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี $R_1, R_2$ และ $R_3$ คือ 12, 15 และ 19 ไมครอน ค่าคัปปลิง $K_1, K_2, K_3$ เป็น 0.9821, 0.96 และ 0.97 .....	72
4.10 แสดงสัญญาณเคออสเมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก ที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี $R_1, R_2$ และ $R_3$ คือ 12, 12 และ 19 ไมครอน ค่าคัปปลิง $K_1, K_2, K_3$ เป็น 0.9821, 0.98 และ 0.93 .....	73
4.11 แสดงสัญญาณเคออสเมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก ที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี $R_1, R_2$ และ $R_3$ คือ 12, 12 และ 19 ไมครอน ค่าคัปปลิง $K_1, K_2, K_3$ เป็น 0.9821, 0.92 และ 0.94 .....	74

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่	หน้า
4.12 แบบจำลองการกรองของโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก เมื่ออินพุตเป็นโซลิตอนสำหรับโพรงสั้นพ้องระดับนาโนเมตร .....	75
4.13 แสดงสัญญาณเคออสเมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก ที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี $R_1$ , $R_2$ และ $R_3$ คือ 10, 7 และ 5 ไมครอน ค่าคัปปลิง $\kappa_1$ , $\kappa_2$ , $\kappa_3$ เป็น 0.01, 0.1 และ 0.1 .....	76
4.14 แสดงสัญญาณเคออสเมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก ที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี $R_1$ , $R_2$ และ $R_3$ คือ 10, 7 และ 5 ไมครอน ค่าคัปปลิง $\kappa_1$ , $\kappa_2$ , $\kappa_3$ เป็น 0.05, 0.1 และ 0.1 .....	77
4.15 แสดงสัญญาณเคออสเมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก ที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี $R_1$ , $R_2$ และ $R_3$ คือ 10, 7 และ 5 ไมครอน ค่าคัปปลิง $\kappa_1$ , $\kappa_2$ , $\kappa_3$ เป็น 0.1, 0.1 และ 0.1 .....	78
4.16 แสดงสัญญาณเคออสเมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก ที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี $R_1$ , $R_2$ และ $R_3$ คือ 10, 7 และ 5 ไมครอน ค่าคัปปลิง $\kappa_1$ , $\kappa_2$ , $\kappa_3$ เป็น 0.2, 0.1 และ 0.1 .....	79

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

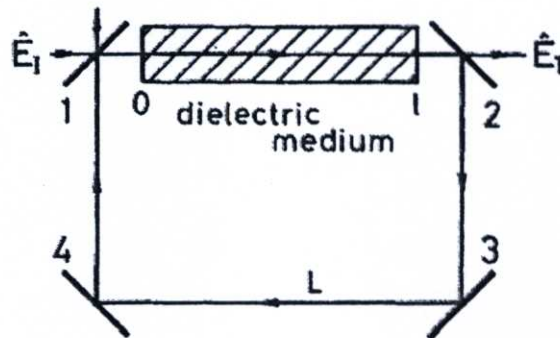
นับตั้งแต่ประมาณปี ค.ศ. 1978 จนถึงปัจจุบัน ได้มีงานวิจัยมากมายเกี่ยวข้องกับการปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นทางแสงทั้งในโพรงสั่นพ้องชนิดแฟบริ - เพอโรต์และโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวน-ใยแก้วนำแสง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นทางแสง เช่น ไบฟูร์เคชัน เกออส และไบสเทบิลิตีเชิงแสงที่เกิดขึ้นในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวน

จากการศึกษาพบว่าม้งงานวิจัยที่น่าสนใจเกี่ยวกับงานวิจัยทั้งทางทฤษฎีและการทดลองเกี่ยวกับปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนโดยอาศัยตัวกลางแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยเริ่มจากปี ค.ศ. 1978 มาร์เบอร์เกอร์และเฟลเบอร์ (Marburger and Felber) [2] ได้เสนอทฤษฎีของอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ชนิดแฟบริ - เพอโรต์แบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ไม่มีการสูญเสียสัญญาณแสง โดยอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ชนิดแฟบริ - เพอโรต์ประกอบด้วยตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหที่ขึ้นอยู่กับความเข้มที่เป็นคุณลักษณะค่าวิถุณระหว่างความเข้มแสงและการส่งผ่านแสงเมื่อแสงที่ตกกระทบเป็นโพลาริซซ์แบบวงกลมและความไม่เป็นเชิงเส้นของสนามเป็นการแก้มการแมกซ์เวลล์สำหรับสนามของโพรงสั่นพ้องที่เป็นระนาบขนานในเทอมของฟังก์ชันวงรี โดยโพรงสั่นพ้องประกอบด้วยกระจกทรงกลม (spherical mirrors) และลำแสงแบบอนันต์ซึ่งเกิด self-focusing ทฤษฎีที่มาร์เบอร์เกอร์และเฟลเบอร์พัฒนาขึ้นเป็นช่วงการทำงานของสวิตซ์เชิงแสง ทรานซิสเตอร์ และตัวจำกัดกำลัง (power limiter)

ในปี ค.ศ. 1979 บิสคอฟเบอร์เกอร์และเชน (Bischofberger and Shen) [3] ได้ศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ชนิดแฟบริ - เพอโรต์แบบไม่เป็นเชิงเส้นทั้งทางทฤษฎีและการทดลองโดยอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ประกอบด้วยตัวกลางชนิดเคอร์ (Kerr medium) โดยพิจารณาโหมดการทำงานที่เป็นช่วงการตอบสนองของแฟบริ-เพอโรต์จากสภาวะทรานเซียนส์ไปยังสภาวะกึ่งคงที่ (quasi-steady-state) ผลที่ได้จากการทดลองสอดคล้องกันดีกับทฤษฎีและพบว่าการทำงานที่สภาวะ quasi-steady-state เวลาการตอบสนองของตัวกลางจะน้อยกว่าเวลาในการวนลูบภายในแควิตี แต่คุณลักษณะของเวลาเมื่อความเข้มแสงอินพุตเพิ่มขึ้นจะมากกว่าเวลาในการวนลูบภายในแควิตี ตลอดช่วงจำกัดของ quasi-steady-state จะ

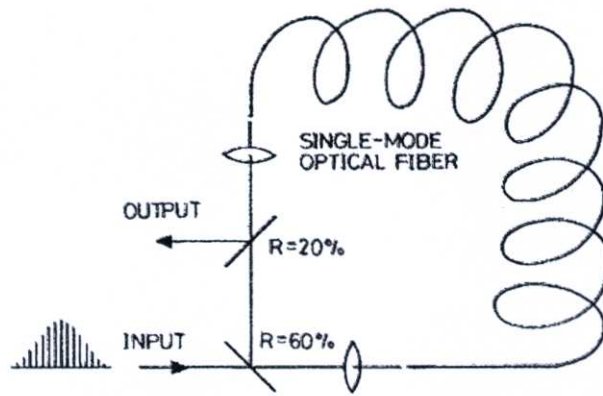
เกิดลักษณะของสวิตชิงเชิงแสงเสมอและความเร็วของการสวิตชิง (switching speed) จะถูกจำกัดโดยเวลากา  
รวนลูภายในแควิตี

ในปี ค.ศ. 1980 อิเคดะและคณะ (Ikeda *et al.*) [4] ได้ศึกษาพฤติกรรมเคออสของการส่งผ่านแสงจากแคว  
วิตีแบบวงแหวน (ring cavity) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 โดยใช้ตัวกลางไดอิเล็กตริกแบบไม่เป็นเชิง-เส้นภายใต้  
การเปลี่ยนแปลงจากสภาวะคงที่ (stationary state) ไปเป็นสภาวะแบบคาบ (periodic state) และไปเป็น  
สภาวะแบบไม่เป็นคาบ (nonperiodic state) เมื่อความเข้มแสงที่ตกกระทบบมีความเข้มแสงเพิ่มขึ้นและเป็น  
ครั้งแรกที่ได้ค้นพบลักษณะเคออสที่เกิดขึ้นจากการวนลูของสนามไฟฟ้าภายในแควิตีแบบวงแหวน



รูปที่ 1.1 แควิตีแบบวงแหวนประกอบด้วยตัวกลางไดอิเล็กตริกแบบไม่เป็นเชิงเส้น

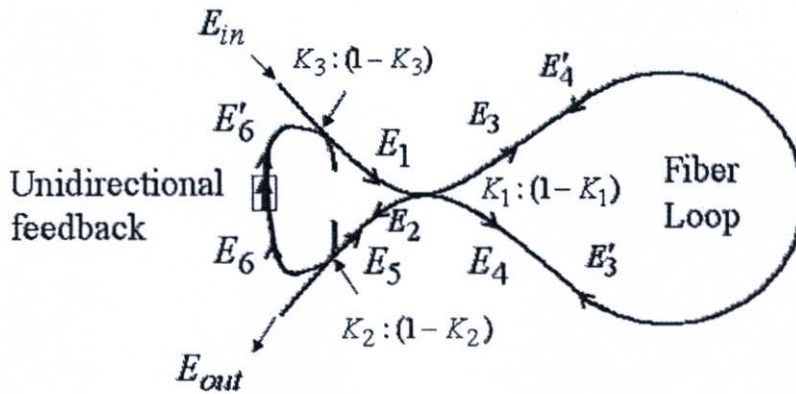
ในปี ค.ศ. 1983 นากาที่สุกะและคณะ (Nakatsuka *et al.*) [5] ได้ค้นพบไบฟิวเรชันตลอดจนการเกิดเค  
ออสในระบบไบสเทเบิลทางแสง (all-optical bistable system) โดยใช้ใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวที่มีค่า  
ดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้น  $1 \times 10^{-13}$  esu ยาว 120 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของแกน 40 ไมโครเมตร  
เป็นตัวกลางแบบไม่เป็นเชิงเส้น และใช้เลนส์ในการรวมแสงเข้าและออกจากใยแก้วนำแสงดังแสดงในรูปที่  
1.3 ลำแสงตกกระทบบเป็นแบบฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 (532 นาโนเมตร) โดยใช้เลเซอร์แอกทีฟโหมดล็อก Q-  
สวิตซ์ ยิตเทียมอลูมิเนียมการ์เนตที่มีความกว้างพัลส์ 140 พิโกวินาที (FWHM) ความกว้างของสเปคตรัม 3 จิ  
กะเฮิร์ต ระยะห่างระหว่างพัลส์ 7.6 นาโนวินาที และความกว้างพัลส์ที่เดินทาง 450 นาโนวินาที



รูปที่ 1.2 ชุดทดลองศึกษาไบฟูร์เคชันคลอจอนเคออสในระบบสเปคเทิลทางแสง ที่ใช้ใยแก้วนำแสง-ชนิด โหมดเดียวเป็นตัวกลางแบบไม่เป็นเชิงเส้น

โดยลักษณะไบฟูร์เคชันที่เกิดขึ้นเป็นแบบ 2 กายที่ระดับกำลังแสงตกกระทบที่แน่นอนซึ่งเป็นการแทรกสอดกันระหว่างสนามแสงตกกระทบและสนามแควิตีที่เป็นการเปลี่ยนเฟสไม่เป็นเชิงเส้นในการเดินทางแต่ละรอบภายในแควิตี และในสภาวะเป็นแบบคาบจะเปลี่ยนเป็นสภาวะเคออสเมื่อกำลังแสงอินพุตเพิ่มขึ้น

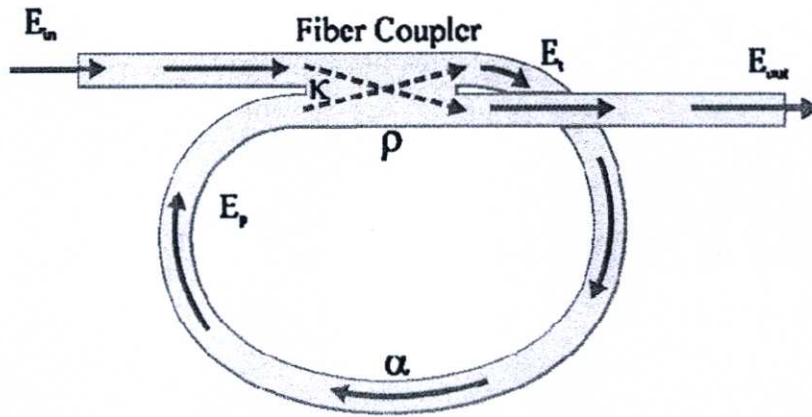
ในปี ค.ศ. 1997 สตีลและคณะ (Steele et al.) [6] ได้ศึกษาและวิเคราะห์อินสตาบิลิตีและไบสเทบิลิตีเชิงแสงในลูปมิเรอร์ใยแก้วนำแสงแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear optical fiber loop mirror: NOLM) ด้วยการย้อนกลับทางแสงดังแสดงในรูปที่ 1.4 โดยใช้วิธีการวิเคราะห์สเทบิลิตีแบบเชิงเส้น (linear stability analysis) และวิธีการวนซ้ำ (iterative method) ดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้นของใยแก้ว ( $n_2$ )  $3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$   $L = 80$  เมตร  $A_{\text{eff}} = 30 \mu\text{m}^2$ ,  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$   $\kappa_1 = 0.25$  และ  $\kappa_2 = \kappa_3 = 0.8$  อินพุตแสงที่ใช้ป้อนเป็นเกาส์เซียนโปรไฟล์ (Gaussian profile) และการวนซ้ำภายในลูป 10000 รอบ ลักษณะของเอาต์พุตสัญญาณแสงมีทั้งไบสเทบิลิตีเชิงแสงและอิคเคออสบิลิตีเกิดขึ้นตามลำดับเมื่อกำลังแสงอินพุตเพิ่มขึ้น และการเปลี่ยนเฟสแบบเชิงเส้นมีอิทธิพลต่อช่วงการเกิดไบสเทบิลิตีและอิคเคออสบิลิตี



รูปที่ 1.3 รูปมิตเตอร์ใยแก้วนำแสงไม่เป็นเชิงเส้นที่มีการย้อนกลับทางแสง

สถิตและคณะได้พิจารณาการเปลี่ยนเฟสแบบเชิงเส้นในช่วง  $[0, 1.75\pi]$  พบว่าเมื่อการเปลี่ยนเฟสแบบเชิงเส้นเปลี่ยนจาก 0 ไปถึง  $0.75\pi$  ช่วงกำลังแสงอินพุตในการเกิดไบสเทบิลิตีและอิคเคออินสเทบิลิตีจะลดลงและที่การเปลี่ยนเฟสแบบเชิงเส้นเป็น  $\pi$  ช่วงกำลังแสงอินพุตในการเกิดไบสเทบิลิตีมีค่ามากที่สุดในขณะที่กำลังแสงอินพุตในการเกิดอิคเคออินสเทบิลิตียังคงลดลงต่อเนื่อง แต่การเปลี่ยนเฟสแบบเชิงเส้นจาก  $\pi$  ไปถึง  $1.75\pi$  ช่วงกำลังแสงอินพุตในการเกิดไบสเทบิลิตีและอิคเคออินสเทบิลิตีจะลดลง

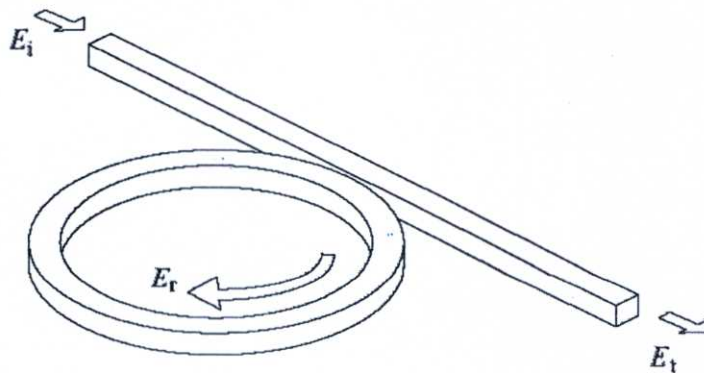
ในปี ค.ศ. 2001 อิมายิและทามูระ (Imai and Tamura) [7] ได้ศึกษาผลของอาพันธ์ที่เป็นพลวัตแบบไม่เป็นเชิงเส้นในระบบโพรงสี่เหลี่ยมแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงดังแสดงในรูปที่ 1.5 ลักษณะพลวัตของเอาท์พุตที่เกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไข  $\Delta v = 0$  (โคฮีเรนต์)  $L = 100$  เมตร  $n_2 = 1 \times 10^{-22} \text{ m}^2/\text{V}^2$   $\kappa = 0.5$  และ  $\rho = 0.1$  พบว่าพฤติกรรมเคออสและแบบคาบเวลาที่เกิดขึ้นจะลดลงและไม่ขึ้นกับเวลาเมื่อแหล่งกำเนิดแสงมีความกว้างสเปกตรัมเพิ่มขึ้น คุณลักษณะไบฟูร์เคชันไม่ขึ้นกับแหล่งกำเนิดโคฮีเรนต์แต่ขึ้นกับการสูญเสียและพารามิเตอร์อื่นๆของโพรงสี่เหลี่ยม สำหรับเอาท์พุตเคออสความยาวโคฮีเรนต์ต้องยาวกว่าความยาวของโพรงสี่เหลี่ยม ความกว้างของสเปกตรัมน้อยสุดที่ทำให้เอาท์พุตเป็นอิสระกับเวลาเป็นส่วนกลับกับความยาวของโพรงสี่เหลี่ยมแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงและความกว้างสเปกตรัมจะลดลงเมื่อโพรงสี่เหลี่ยมแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงมีการสูญเสียเพิ่มขึ้น



รูปที่ 1.4 โมเดลโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงที่มีคัปเปิลอร์ใยแก้วนำแสงอันเดียว

เนื่องจากในระบบการสื่อสารเชิงแสงพบว่า (Optical communication) จะเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นเกิดขึ้น เช่น เคออส ไบฟูร์เคชัน และไบสแตบิลิตีเชิงแสง ซึ่งปรากฏการณ์ที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในระบบการสื่อสารและการประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆจึงพยายามหาวิธีการป้องกันและควบคุม ยกเว้นเฉพาะกรณีไบสแตบิลิตีทางแสงที่มีประโยชน์ เช่น ใช้เป็นสวิตช์เชิงแสง ลอจิกเกต ทางแสง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์เป็นการศึกษาและควบคุมปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กเพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณใหม่โดยอาศัยการเกิด Second Harmonic Generation (SHG) สำหรับความไม่เป็นเชิงเส้นภายในโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก

โพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนเป็นลักษณะที่นำคลื่นง่ายๆที่เป็นโครงสร้างแบบวงแหวน ดังแสดงในรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 ไลอะแกรมโครงสร้างของโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนที่รวมในท่อนำคลื่นอันเดียว

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

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

เมื่อ  $m$  คือ จำนวนโหมดตามยาวและเป็นจำนวนเต็ม

$\lambda_m$  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  $k^2 + r^2 = 1$  และ  $a = e^{-\alpha_0 L/2}$  คือสนามการส่งผ่านของการวนรอบ (Round trip field transmission) เมื่อ  $\alpha_0$  เป็นการสูญเสียของคลื่นที่เดินทางภายในวงแหวนและ  $\tau$  คือเวลาการวนรอบภายในโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวน เฟสการวนรอบในโพรงสั้นพ้อง  $\phi$  กำหนดโดย

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

สนามการส่งผ่านที่เอาท์พุทของท่อนำคลื่นในส่วนที่เป็นเส้นตรง  $E_t$  เป็นการกำหนดโดย

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

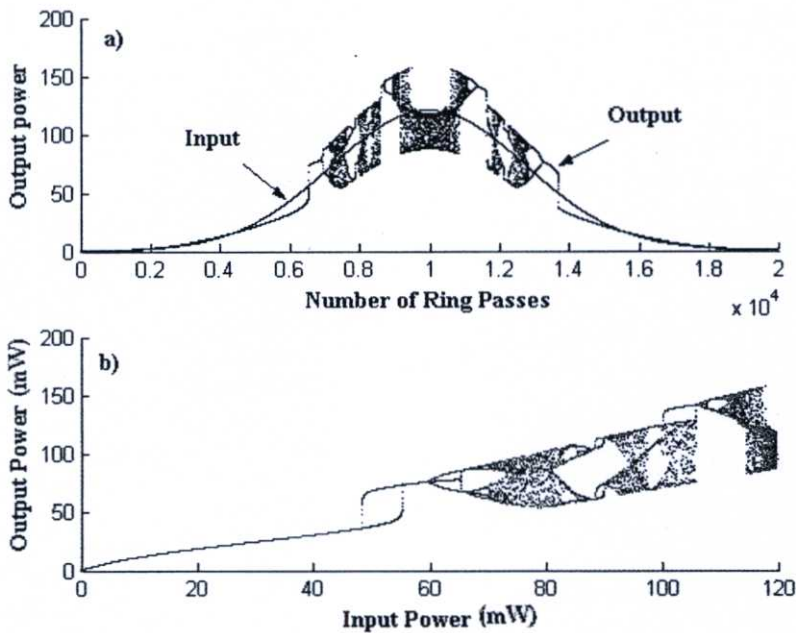
ที่สภาวะคงที่ฟังก์ชันทรานสเฟอร์ของการส่งผ่านในโพรงสั้นพ้องสามารถเขียนได้เป็น

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

จากสมการที่ (1.5) แสดงให้เห็นว่าโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนมีหลักการคล้ายกับแควิตีชนิดแฟบริ-เพอโรต์ (Fabry-Perot cavity) โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างไดอะแกรมที่แสดงในรูปที่ 1.1 จะสอดคล้องกับแควิตีชนิดแฟบริ-เพอโรต์ที่มีกระจกอินพุทมีค่าสนามการสะท้อนกลับเป็น  $r$  และเอาท์พุทเป็นกระจกที่มีการสะท้อนกลับอย่างสมบูรณ์ แต่อย่างไรก็ตามสนามที่เดินทางภายในแควิตีแบบวง-แหวนจะเป็นคลื่นที่เคลื่อนที่ (traveling wave) เมื่อเปรียบเทียบกับแควิตีชนิดแฟบริ-เพอโรต์ซึ่งมีการสั้นพ้องเป็นคลื่นนิ่ง

จากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้นภายในโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กแสดง เกออส ไบฟูร์เคชัน และไบสเตบิลิตีเชิงแสง [8,9] การจำลองผลของเอาท์พุทกำลังแสงและผลของดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้น ที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิง

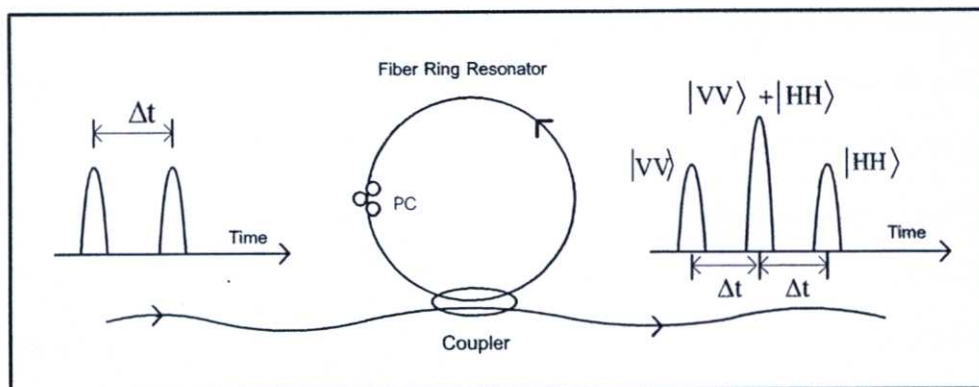
เส้น ในโพรงสี่ห้องแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว โดยกำหนดให้การเปลี่ยนเฟสแบบเชิงเส้นคงที่ ( $\phi_L = 0$ ) ความยาวของวงแหวนใยแก้ว 80 เมตร และอัตราส่วนการคัปปลิงกำลังแสง ( $\kappa$ ) เป็น 0.0225 จากรูปที่ 1.6(a) แสดงไบฟูร์เคชันไดอะแกรม และ 1.6(b) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตกำลังแสง ซึ่งจะเห็นได้ว่าระดับกำลังแสงอินพุตในการเกิดไบสเทบิลิตีเชิงแสง เมื่อ  $n_2 = 2.8 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$  ที่เป็นผลจาก  $n_2$  ที่เป็นผลจากดัชนีของแสงที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามกำลังของอินพุตแสง



รูปที่ 1.6 ไบฟูร์เคชันไดอะแกรมของกำลังแสงเอาต์พุตในโพรงสี่ห้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก ที่เปลี่ยนแปลงตามกำลังแสงอินพุต เมื่อ  $n_2 = 2.8 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$  a) กำลังแสงเอาต์พุตกับจำนวนลูปโพรงสี่ห้องแบบวงแหวน b) กำลังแสงเอาต์พุตกับกำลังแสงอินพุต

อีกงานวิจัยหนึ่งที่ขาดเสียไม่ได้ก็คือการศึกษาการเกิดของคู่ความเกี่ยวพันทางแสง (Entangled Photon) [10] ซึ่งเป็นการศึกษาคุณสมบัติทางควอนตัมของแสงโดยอาศัยโพรงสี่ห้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก เมื่อสถานะโพลาไรซ์ของแสงที่ประกอบกันที่ตั้งฉากกันเป็น แนวนอน (horizontal,  $|H\rangle$ ) และ แนวตั้ง (vertical,  $|L\rangle$ ) ส่วนของ PC เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการควบคุมสถานะของการโพลาไรซ์ของแสง

ภายในโพรงสี่เหลี่ยมวงแหวนขนาดเล็กเพื่อให้คงสภาพการโพลาไรซ์ได้ จากผลการทดลองดังกล่าว แสดงให้เห็นการเกิดคู่ความเกี่ยวพันทางแสงโดยอาศัยโพรงสี่เหลี่ยมวงแหวนขนาดเล็ก เพื่อ ทำการศึกษาสถานะทางควอนตัมของแสงได้



รูปที่ 1.7 ไดอะแกรมแสดงการสร้างการเกิดโพลาไรซ์ต่างเวลากันสำหรับการทดลอง

ในงานวิจัยเป็นการนำวิธีใหม่ในการสร้างรหัสแบบควอนตัม (Quantum key distribution , QKD ) เพื่อเป็นการรักษาความปลอดภัยในการรับส่งข้อมูลสำหรับการสื่อสารทางแสง หลายวิธีในการสร้างรูปแบบของการเข้ารหัสแบบควอนตัมรูปแบบอีกแบบหนึ่งของอนาคตของระบบการสื่อสารทางแสง จากงานวิจัยของ สืบตระกูล สุชาติ [10] ตัวอย่างการทดลองสำหรับ QKD ของระบบ optical wireless เป็นรูปแบบของการใช้รหัสควอนตัมในการสื่อสาร การสร้างรหัสสัญญาณสถานะควอนตัมของคู่ความสัมพันธ์โฟตอนสำหรับโพลาไรซ์ในรูปแบบทั่วไป (Quantum entangled photon generation) [11,12] เมื่อ QKD การสื่อสารในรูปแบบระยะทางที่ไกล สำหรับวิธีการในการสร้างคู่ความสัมพันธ์โฟตอนและสามารถทวนสัญญาณได้ อย่างไรก็ตามสำหรับงานวิจัย นิธิโรจน์ พรสุวรรณเจริญ และ ปรีชา ยูพาพิน [13 ,14 ,15] ได้มีการนำเอาคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นของแสงภายในโพรงสี่เหลี่ยมวงแหวนขนาดเล็กสร้างสัญญาณเคออสเพื่อใช้ในระบบสื่อสารของใยแก้วในอนาคต ปรีชา ยูพาพิน ได้แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้ QKD ในระบบของการสื่อสารทางแสง[ 16 ] สำหรับ Fietz และ Shvets [17] มีรายงานสำหรับการใช้คู่ความสัมพันธ์โฟตอนของการโพลาไรซ์โดยใช้สิ่งประดิษฐ์โพรงสี่เหลี่ยมวงแหวนขนาดเล็กเป็นการสนับสนุนงานวิจัยของ สืบตระกูล สุชาติ [18] สำหรับการสร้างคู่ความสัมพันธ์โฟตอนของการโพลาไรซ์สามารถทวนสัญญาณได้โดยยังคงสถานะทางควอนตัมของสัญญาณเหมือนเดิม ท้ายที่สุดงานวิจัยของ Yang [19] ได้แสดงให้เห็นว่าสามารถสร้างสัญญาณ SHG จากโพรงสี่เหลี่ยมวงแหวนขนาดเล็กที่ทำจาก AlGaAs เป็น

สำหรับเป็นอุปกรณ์ในระบบเครือข่ายใยแก้วนำแสง ทั้งยังทำการศึกษาคณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางแสง ของโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก และศึกษาว่าผลกระทบใดบ้างที่มีผลทำให้เกิดความไม่เป็นเชิงเส้นในเนื้อสารความสัมพันธ์ของขนาดวงแหวนกับสัญญาณที่ออกมา รวมไปถึงขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่นที่มีผลกระทบต่อสัญญาณที่สัมพันธ์กับกำลังของแสงที่ให้กับโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก ผลที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นคือเป็นผลที่ได้จาก เชิงเส้น (linear) , ลำดับที่ 2(second-order) , ลำดับที่ 3(third-order) และ ลำดับที่อื่นๆ (other-order) ที่รวมกันอยู่มากมาย แต่ในงานวิจัยต้องการศึกษาว่า การสร้างฮาร์โมนิกที่ 2 (second-harmonic generation , SHG) เกิดขึ้นได้อย่างไร จากการศึกษาทำให้ทราบมาแล้วว่ามีค่าความไม่เป็นเชิงเส้นหลายค่า แต่ในงานวิจัยต้องการเทอมที่เป็นฮาร์โมนิกที่ 2 โดยสัญญาณที่ให้ออกมาจากวงแหวนผสมกันอยู่มากมายแต่ไม่ต้องการสัญญาณ โดยในงานวิจัยต้องการทำการศึกษาเฉพาะสัญญาณที่เป็นสัญญาณ SHG ในงานวิจัยเป็นการศึกษาตัวกรองสัญญาณแสงโดยสัญญาณที่ให้อยู่ในรูปของ พัลส์เกาส์เซียน(Gaussian pulse) ที่ให้กับโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กซึ่งความยาวคลื่นที่ใช้ทำการศึกษาคือ 1550 nm เพื่อทำการสร้างแบบจำลองของการสัญญาณ SHG จากความยาวคลื่นที่กำหนดให้ในข้างต้น ทำการออกแบบวงแหวนเพื่อทำการกรอง SHG ในแต่แบบ วงแหวนในการออกแบบทั้งแบบ 1 วงและนำมาต่อกันยาวเป็น 2 , 3 และ 4 ตามลำดับ เพื่อให้ได้สัญญาณ SHG ดีที่สุดและมีความกว้างของความยาวคลื่นที่แคบซึ่งทำให้สามารถที่จะหาค่าของ SHG ที่ดี สัญญาณ SHG ทำการกรองจากวงแหวนในวงต่างๆเพื่อให้ค่าของ SHG ของสัญญาณ ทำการกรองสัญญาณให้เกิด SHG ทั้งหมด หรือกรองสัญญาณให้เหลือเฉพาะสัญญาณที่ต้องการได้โดยอาศัยการเปลี่ยนขนาดของโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก หรือ การเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์ของแสงที่ไปเข้าในวงแหวน ในการเปลี่ยนค่าต่างๆเพื่อให้ได้สัญญาณที่ต้องการ ทำการเปรียบเทียบสัญญาณ SHG ที่ได้จากแบบ เกาส์เซียน และ โซลิตอน มีข้อได้เปรียบเสียเปรียบของพัลส์ที่เป็นโซลิตอน ทำการศึกษาโพลาไรซ์ของสัญญาณแสงที่ได้จากโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กขนาดเล็ก โดยอาศัยแยกสถานะโพลาไรซ์ (Polarize beam splitter , PBS) ในการศึกษา รวมไปถึงการตรวจสอบสถานะทางควอนตัมของแสงด้วยเพื่อให้เห็นว่าเป็น SHG จริงที่เกิดจากการกรองของวงแหวน สุดท้าย สามารถกรองความยาวคลื่นค่าใดก็ได้จากการออกแบบโดยใช้วงแหวนขนาดเล็กในการออกแบบ อาศัย ปรากฏการณ์ของเคอร์ (Kerr effect) และ คุณสมบัติของโซลิตอนเพื่อทำให้เกิดการเสริมกันขึ้นเป็นความยาวคลื่นแบบต่อเนื่องได้ อาจ รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัด ( Effective Area ,  $A_{eff}$ )ของท่อนำคลื่น เพื่อให้สัญญาณที่ได้มีความเข้มมากขึ้น

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เข้าใจการประยุกต์ใช้ตัวกรองสัญญาณ SHG ได้โดยใช้โพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กได้
- 2) สามารถเลือกสัญญาณโพลาริซโดยใช้ PBS เพื่อใช้ในทางควอนตัม
- 3) ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กำหนดคุณลักษณะการกรองของตัวกรองโพรงสั้นพ้อง
- 4) สามารถกำหนดคุณลักษณะการกรองความยาวคลื่นแสงของตัวกรองโพรงสั้นพ้องวงแหวนได้ตามต้องการ
- 5) สามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้ในการออกแบบและสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้งานได้จริง
- 6) สามารถออกแบบวงแหวนในการกรองโดยพัลส์โซลิตอนสำหรับการสร้างความยาวคลื่นแบบต่อเนื่องได้

## 1.5 วิธีดำเนินการการทำวิทยานิพนธ์

สำหรับแผนการดำเนินการแบ่งเป็น 12 ขั้นตอนต่างๆดังนี้

**ขั้นตอนที่ 1** ศึกษาหลักการพื้นฐานทางแสงของโพรงสั้นพ้องวงแหวน

**ขั้นตอนที่ 2** ศึกษาคุณสมบัติความเป็นความไม่เป็นเชิงเส้นทางแสงในสารที่ใช้ออกแบบโพรงสั้นพ้องวงแหวน

**ขั้นตอนที่ 3** ศึกษาคุณสมบัติของ พัลส์เกาส์เซียน (Gaussian pulse) และ พัลส์โซลิตอน (Soliton pulse)

**ขั้นตอนที่ 4** ศึกษาการเกิด SHG ในแบบต่างๆ โดยอุปกรณ์ของการสร้างความไม่เป็นเชิงเส้นทางแสงที่เป็นแบบการใช้ PBS และ ปริซึมแบ่งแสง

**ขั้นตอนที่ 5** ศึกษาการประดิษฐ์โพรงสั้นพ้องวงแหวนระดับไมโครเมตรที่ใช้เป็นตัวกรองสัญญาณ SHG ด้วยระบบวัสดุสารกึ่งตัวนำ

**ขั้นตอนที่ 6** ศึกษาบทความที่มีการประยุกต์ใช้โพรงสั้นพ้องวงแหวนระดับไมโครเมตรเป็นตัวกรองสัญญาณแสง การส่งผ่านแสงในโพรงสั้นพ้อง การวิเคราะห์สเปกตรัมการส่งผ่านของตัวกรองโพรงสั้นพ้องวงแหวนที่ต่อกัน

**ขั้นตอนที่ 7** ออกแบบโครงร่างตัวกรองโพรงสั้นพ้องวงแหวน 1 วงและที่ต่ออันดับกัน 2 , 3 และ 4 วงหาความสัมพันธ์ฟังก์ชันถ่ายโอนทั้งในรูปสนามไฟฟ้าและความเข้มสนามไฟฟ้า ในขั้นตอนอาจมีการต่อวงแหวนมากกว่า 4 วงก็ได้เพื่อทำการกรองให้ได้สัญญาณที่ต้องการ และ มีความคมชัดของสัญญาณตามที่ต้องการหรือไม่

**ขั้นตอนที่ 8** จำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของโพรงสั้นพ้องวงแหวนที่ได้ในขั้นตอนที่ 5 และประมวลผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เปรียบเทียบผลที่ได้ในเรื่องเดียวกันกับบทความระดับนานาชาติ ถ้ามีข้อบกพร่องทำการปรับปรุงแก้ไข

**ขั้นตอนที่ 9** จำลองแบบโดยให้สัญญาณเป็น พัลส์เกาส์เซียน (Gaussian pulse) ให้กับโพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็กในการกรองสัญญาณ และ เปลี่ยนค่าการกรองสำหรับค่าความยาวคลื่นที่ต่างกันออกไป

**ขั้นตอนที่ 10** จำลองแบบโดยให้สัญญาณเป็น พัลส์โซลิตอน (Soliton pulse) ให้กับโพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็กในการกรองสัญญาณเพื่อให้ได้ค่าสำหรับความยาวคลื่นเป็นแบบต่อเนื่อง

**ขั้นตอนที่ 11** วิเคราะห์ผลที่ได้จากการกรองในรูปแบบของ พัลส์เกาส์เซียน (Gaussian pulse) และ พัลส์โซลิตอน (Soliton pulse) เพื่อนำไปใช้ในการกรองหาค่าของความยาวคลื่นที่เป็นแบบค่าต่อเนื่องได้

**ขั้นตอนที่ 12** สรุปการทำวิทยานิพนธ์และแนวทางในการพัฒนาต่อไป

## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย คือ การศึกษาทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การเดินทางของแสงในเนื้อสาร ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดความไม่เป็นเชิงเส้นเกิดขึ้นจากคุณสมบัติดังกล่าว เป็นผลของหลายลำดับ (other-order) โดยในงานวิจัยได้ให้ความสนใจกับลำดับที่ 2 (second-order) ที่ต้องการศึกษา และทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงในแบบของโพลาริซ ซึ่งเป็นการเชื่อมต่อการศึกษาระหว่างควอนตัมของแสง

#### 2.1 สมการแมกซ์เวลล์และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (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 )

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

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

สำหรับการโพลาไรซ์ในสารสามารถประยุกต์รูปแบบใหม่ได้เป็น

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

โดยที่

$\epsilon_0$  คือ การแพร่ของไฟฟ้า (Electric permittivity) สำหรับในสุญญากาศ ( $8.854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ )

$\chi$  คือ ความอ่อนไหวทางไฟฟ้า (Electric susceptibility) สำหรับในเนื้อสาร

เขียนใหม่สำหรับสมการคลื่นที่ของสนามไฟฟ้าใหม่เป็น

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

เมื่อแทนด้วย  $\epsilon_r$

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

โดยที่

$\epsilon_r$  คือ ความสัมพันธ์ในการแพร่ทางไฟฟ้า (Relative electric permittivity) สำหรับในเนื้อสารส่วนที่เป็นสนามแม่เหล็กเขียนได้เป็น

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

โดยที่

$\mu_0$  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

$\chi_M$  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) [ 23 ] ได้ทำการสรุปการเคลื่อนที่ที่เกิดจากการไหลของกระแสกับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้สมการแมกซ์เวลล์ เป็นสมการที่

เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าสำหรับสมการแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีความสัมพันธ์กันดังนี้

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

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

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

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

โดยที่

$\rho$  คือ ค่าความหนาแน่นของประจุ ( the free charge density )

$j$  คือ ค่าความหนาแน่นของกระแส ( the free current density )

จากการศึกษาทำให้ทราบว่า 2 ข้อแรกเป็นสมการสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กที่อยู่กับที่ ซึ่งมีที่มาจากสมการของกฎของเกาส์ (Gauss's law) โดยสนามไฟฟ้าเป็นแนวคิดการสร้างผิวปิดรอบสนามไฟฟ้าซึ่งจะทำให้ได้ค่าของความหนาแน่นที่อยู่ภายในผิวปิด ส่วนสนามแม่เหล็กก็เช่นกันแต่จะได้ว่าเท่ากับศูนย์ด้วยแนวคิดที่ว่าเส้นแรงแม่เหล็กเข้าต้องเท่ากับออกจึงทำให้ได้ศูนย์ กฎข้อ 3 เป็นการรวมสมการความสัมพันธ์ของ ฟาราเดย์ (Faraday) และ เลนซ์ (Lenz) ที่เป็นความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า 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 ไม่

มีกระแสไหลผ่าน ( $j = 0$ ) ทำการพิจารณาสมการที่ 4 โดยใช้ความสัมพันธ์  $D$  กับ  $E$  จากสมการที่ 2.3 และ  $H$  กับ  $B$  จากสมการที่ 2.8 แทนค่าให้อยู่ในรูปใหม่ได้ว่า

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

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

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

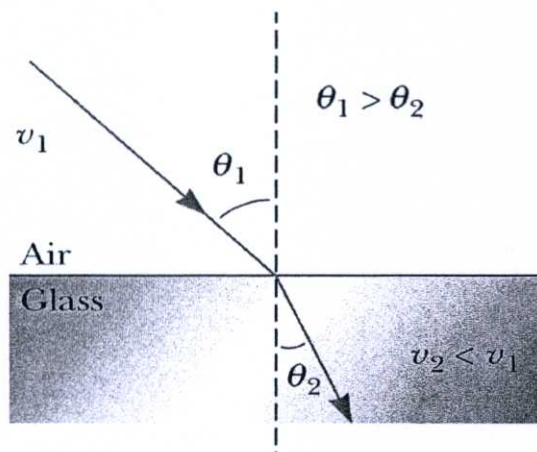
จากความสัมพันธ์ ทำให้ได้ค่าความต่างของความเร็วของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศ และ ความเร็วของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางใดๆ เป็น

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

โดยที่  $n$  คือ ค่าของดัชนีหักเหของแสง (refractive index)

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

โดยค่าของดัชนีหักเหของแสง ความสำคัญกับการเคลื่อนที่ของแสงในเนื้อของสารใดๆ



รูปที่ 2.1 แสดงการหักเหของแสงจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหที่ต่างกัน

จากสมการแมกซ์เวลล์ เป็นสมการการเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก หรือ ที่รู้จักกันในรูปแบบของแสงที่เป็นรูปแบบหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกมาจากดวงอาทิตย์ จากแนวคิดที่ว่า  $\omega$

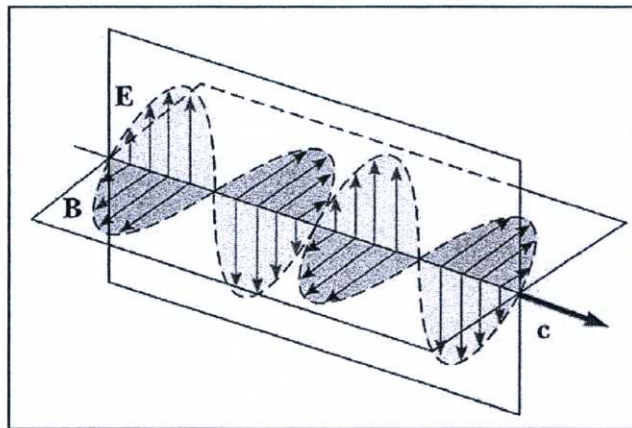
คือ ความเร็วเชิงมุมของการแพร่ไปของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และ เพื่อง่ายในการพิจารณา กำหนดให้การเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในแกนอ้างอิงของทิศทาง  $Z$  โดยจะได้สมการความสัมพันธ์การแพร่ของสนามแม่เหล็ก และ สนามไฟฟ้าในระนาบของ  $X$  กับ  $Y$  กำหนดให้การแพร่ของสนามไฟฟ้ามีเฉพาะในแกน  $X$  ทำให้ได้ว่า  $E_y = E_z = 0$  และ กำหนดให้การแพร่ของสนามแม่เหล็กมีเฉพาะในแกน  $Y$  ทำให้ได้ว่า  $B_x = B_z = 0$  จากสมการแมกซ์เวลล์ สมการที่ 2.11 และ 2.13 ถูกเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_x}{\partial z} &= -\frac{\partial B_y}{\partial t} \\ -\frac{\partial B_y}{\partial z} &= \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial E_x}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.21)$$

จากสมการข้างต้นนี้สามารถผลเฉลยของสมการคำตอบของอนุพันธ์ได้ว่า

$$\begin{aligned} E_x(z, t) &= E_{x0} \cos(kz - \omega t + \phi) \\ B_y(z, t) &= B_{y0} \cos(kz - \omega t + \phi) \end{aligned} \quad (2.22)$$

โดยสามารถเขียนการแพร่ของการสนามแม่เหล็ก และ สนามไฟฟ้า ของแสงได้เป็นดังนี้



รูปที่ 2.2 การแพร่ของการสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าของแสง (Electromagnetic wave)

โดยที่

$E_{x0}$  คือ ความสูงของสันคลื่นสูงสุด ( amplitude )

$\phi$  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  $\lambda_m$  คือ ค่าของความคลื่นที่เข้าไปในเนื้อสาร

## 2.2 ความไม่เป็นเชิงเส้นทางแสง (Nonlinear Optic)

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

$\chi$  คือ สภาพความอ่อนไหวทางไฟฟ้า (Electric Susceptibility) ที่อยู่ในรูปของเมตริกซ์เทนเซอร์ (Matrix tensor) จากการศึกษาทำให้เขียนใหม่เพื่อให้ง่าย ในรูปแบบของ โพลาริเซชัน แทนด้วย

$$\begin{aligned}
P^{(1)} &= \varepsilon_0 \chi^{(1)} E \\
P^{(2)} &= \varepsilon_0 \chi^{(2)} E^2 \\
P^{(3)} &= \varepsilon_0 \chi^{(3)} E^3 \\
&\vdots \\
P^{(n)} &= \varepsilon_0 \chi^{(n)} E^n
\end{aligned} \tag{2.25}$$

แทนเข้าไปในสมการที่ 2.24 ในรูปของ โพลาริเซชัน และ อธิบายความหมายของแต่ละเทอมอย่างไร

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

จากสมการข้างต้นสามารถอธิบายได้ว่า  $\chi^{(n)}$  เป็น เทอมที่เป็นเชิงเส้น และ เทอมที่ไม่เป็นเชิงเส้น ของสภาพความอ่อนไหวทางไฟฟ้า 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 เป็นผลจากกำลังของสนามที่สูงเข้าไปทำให้เกิดการสั่นของสนามที่ให้เข้าไปทำให้เกิดความถี่ใหม่ขึ้นมาทำให้ความถี่ที่ออกมา มีความถี่เปลี่ยนไปจากความถี่เดิมที่ให้เข้าไปเป็น  $2\omega$  หรือ  $3\omega$  เป็นต้น

### โพลาริเซชันเชิงเส้น ( Linear Polarization )

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

$$P^{(1)}(\omega) = \varepsilon_0 \chi^{(1)}(\omega) E(\omega) \tag{2.27}$$

โดยค่าของความถี่ของสนามที่ให้เข้าไปไม่มีสนามภายในลบกวน สนามที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงไม่มี โดยเทอมจะได้ว่าไม่มีการสร้างความถี่ใหม่ขึ้นมา โดยสามารถเขียนในรูปของเมตริกซ์เทนเซอร์ สำหรับสภาพความอ่อนไหวทางไฟฟ้าที่  $\chi^{(1)}$  ซึ่งมีแกนการกระทำต่อกันเพียงในแกนสนามอ้างอิงสามแกนคือ x, y

และ  $z$  โดยเป็นการกระทำของสนามที่ให้เข้าไป เมื่อมีเฉพาะสนามที่ให้เข้าไป เวกเตอร์ที่เข้าไปเป็น  $3^2 = 9$  เทอมสำหรับสภาพความอ่อนไหวทางไฟฟ้าที่  $\chi^{(1)}$  ที่เป็น เมตริกซ์  $3 \times 3$  เขียนสมการได้เป็น

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

จากสมการที่ 2.28 เขียนให้อยู่ในรูปที่ลดรูปได้เป็น

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

เมื่อกำหนดให้  $i, j = x, y, z$

**ฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 ของโพลาริซ (Second Order polarized)**

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

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

สำหรับเวกเตอร์สนามที่ให้เข้าไป  $3^2 = 9$  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

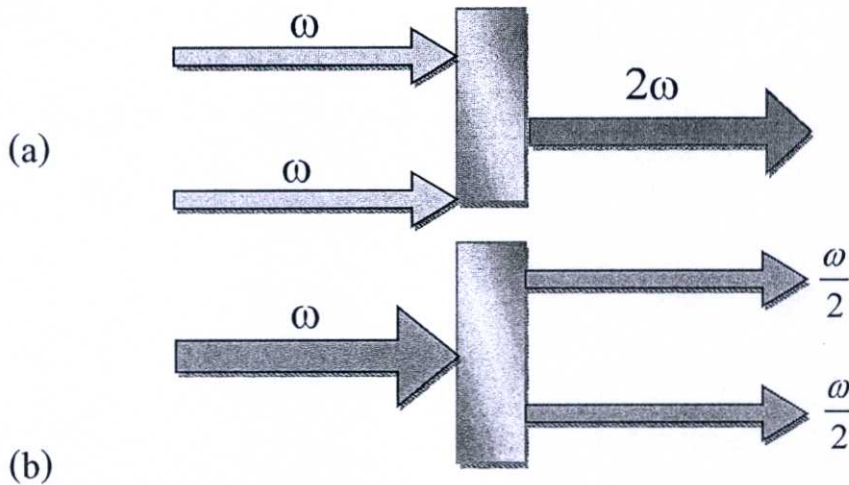
$$P_{NLi}^{(2)}(\omega = \omega_1 + \omega_2) = \epsilon_0 \sum_{jk} \chi_{ijk}^{(2)}(\omega_1, \omega_2) E_j(\omega_1) E_k(\omega_2) \quad (2.32)$$

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 และการแบ่งความถี่ออกเป็นสองส่วนโดยในกรณีของ SHG ที่สนใจ ความถี่ทั้งสองที่ได้จะแบ่งเท่าๆกัน ( $\omega_s = \omega_i = \frac{\omega}{2}$ ) สามารถเขียนเป็นแผนผังดังรูปที่ 2.3 ที่เป็นการแสดงการรวม และ แบบครึ่งของความถี่เดิม



รูปที่ 2.3 (a) แผนผังแสดงการรวมกันของความถี่ และ (b) การแบ่งกันของความถี่คลื่น

### ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ของโพลาริซ ( Third Order polarized )

ในกรณีของความไม่เป็นเชิงเส้นของโพลาริเซชันสำหรับฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ( third order หรือ third harmonic ) โดยในที่ทำการให้สนามที่ต่างกัน โดยความถี่ที่ให้เป็นที่ผลรวม ผลต่าง และ แบบหลายค่าของความถี่ สำหรับความถี่ถูกสร้างในระบบของเนื้อสารเองที่เกิดจาก ฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 เอง และ ตัวของ ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ด้วยเข้าไปในระบบ จากความถี่ที่เข้ามาจากภายนอกที่ให้เข้าไปด้วย จะสังเกตสามารถมองได้ว่าความถี่ที่เกิดขึ้น ได้มีทั้งการรวมกันการลบกัน ทั้งรวมกันสามเทอม แม้แต่ อาจจะรวมกันเพียงสองเทอมก็ได้ สามารถที่จะเขียน ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 สำหรับโพลาริเซชัน ได้เป็น

$$P_{NL}^{(3)}(\omega = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3) = \epsilon_0 \chi^{(3)}(\omega_1, \omega_2, \omega_3) E(\omega_1) E(\omega_2) E(\omega_3) \quad (2.34)$$

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

$$\begin{bmatrix} P_{NLx}^{(3)}(\omega) \\ P_{NLy}^{(3)}(\omega) \\ P_{NLz}^{(3)}(\omega) \end{bmatrix} = \epsilon_0 \begin{bmatrix} \chi_{xxxx}^{(3)} & \chi_{xxyy}^{(3)} & \cdots & \chi_{xzzz}^{(3)} \\ \chi_{yxxx}^{(3)} & \chi_{yyxy}^{(3)} & \cdots & \chi_{yzzz}^{(3)} \\ \chi_{zxxx}^{(3)} & \chi_{zxyy}^{(3)} & \cdots & \chi_{zzzz}^{(3)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x(\omega_1)E_x(\omega_2)E_x(\omega_3) \\ E_x(\omega_1)E_x(\omega_2)E_y(\omega_3) \\ \cdots \\ E_z(\omega_1)E_z(\omega_2)E_y(\omega_3) \\ E_z(\omega_1)E_z(\omega_2)E_z(\omega_3) \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

จากสมการที่ 2.35 เขียนให้อยู่ในรูปที่ลดรูปได้เป็น

$$P_{NLi}^{(3)}(\omega = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3) = \epsilon_0 \sum_{jkl} \chi_{ijkl}^{(3)}(\omega_1, \omega_2, \omega_3) E_j(\omega_1) E_k(\omega_2) E_l(\omega_3) \quad (2.36)$$

จากทอมที่ศึกษาจะเห็นว่า มีทอมมากมายหลายค่าที่มีผลต่อการเกิดความไม่เป็นเชิงเส้นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะทำให้ได้ว่าความถี่ที่ออกมาหลายค่า ในเนื้อสารจริงจะต้องทำการพิจารณา  $\chi^{(n)}$  โดยเป้าหมายของงานวิจัยของต้องการให้คุณสมบัติที่เด่น เมื่อต้องให้  $\chi^{(2)}$  เเด่นและให้เหลือเฉพาะทอมที่เป็นฮาร์โมนิกลำดับที่ 2 ที่ต้องการความถี่เป็นเท่าจากความถี่ที่ให้เข้าไป โดยสามารถอธิบายในหัวข้อของ การสร้างฮาร์โมนิกที่ 2 (Second Harmonic Generation , SHG) ต่อไป

### ปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr effect)

ปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr effect) [8,9] คือ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในเนื้อสารที่เป็นความไม่เชิงเส้นของการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหภายในเนื้อสาร โดยจะส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหตามความเข้มของสัญญาณ สำหรับ  $\chi^{(2)}$  กระเจิงและหายไปภายใต้เงื่อนไขของโครงสร้างที่เป็นสัดส่วนกัน (Symmetric) ค่าที่ส่งผลต่อ ปรากฏการณ์เคอร์จึงมีเฉพาะ  $\chi^{(3)}$  ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหของสาร สามารถสรุปเป็นสมการความสัมพันธ์ได้เป็น

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

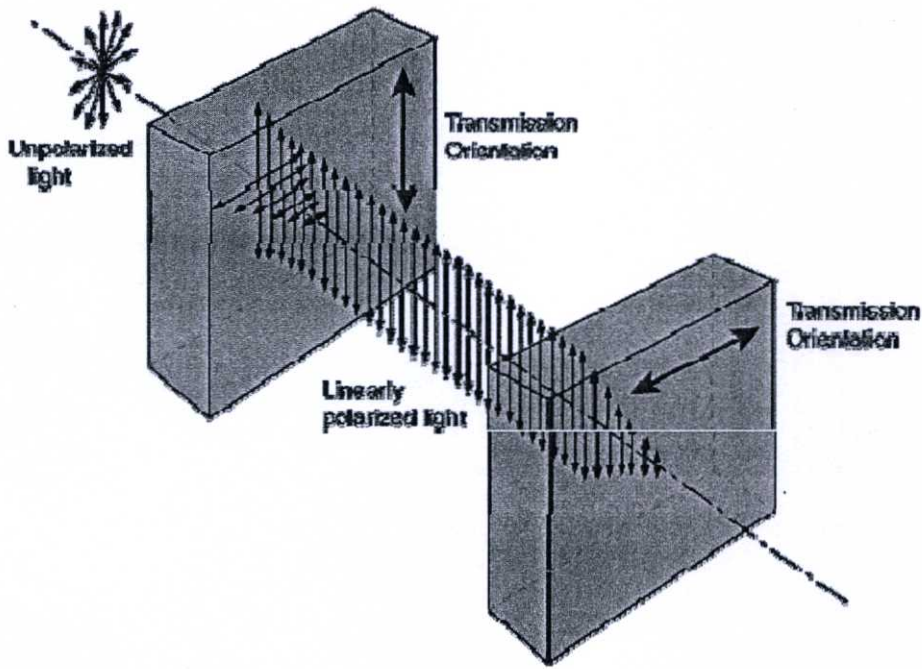
โดยที่  $n$  เป็นค่าของดัชนีหักเหรวมทั้งหมด  $n_0$  คือค่าของดัชนีหักเหของตัวสาร  $n_2$  คือค่าดัชนีหักเหสำหรับความไม่ต่อเนื่องของสารเองหรือ ค่าคงที่ของเคอร์ (Kerr-constant) ได้จาก  $n_2 = \frac{3\chi^{(3)}}{4\epsilon_0cn_0^2}$  และ  $I$  เป็นค่าของความเข้มของสัญญาณแสง ได้จาก  $I = \frac{1}{2}\epsilon_0cn_0|\dot{E}|^2$  โดยค่า  $n_2$  สำหรับใยแก้วมีค่าในช่วง  $n_2 = 2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$  ในการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีภายในเนื้อสารที่ให้สัญญาณสิ่งที่มีผลก็คือ พื้นที่หน้าตัดในการส่งสัญญาณ ( $A_{eff}$ ) สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

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

โดยที่  $P$  เป็นกำลังสำหรับการใส่เข้าไปในพื้นที่หน้าตัดของแกนของสายใยแก้วนำแสง หรือ ความเข้มของแสงที่ให้เข้าไปสามารถเขียนให้อยู่ในรูปกำลังต่อพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่น โดยในการออกแบบวงแหวนขนาดเล็ก คือ พื้นที่หน้าตัดในการออกแบบท่อนำคลื่นของวงแหวนโพรงสั้นพ้องขนาดเล็กแบบไม่เป็นเชิงเส้น

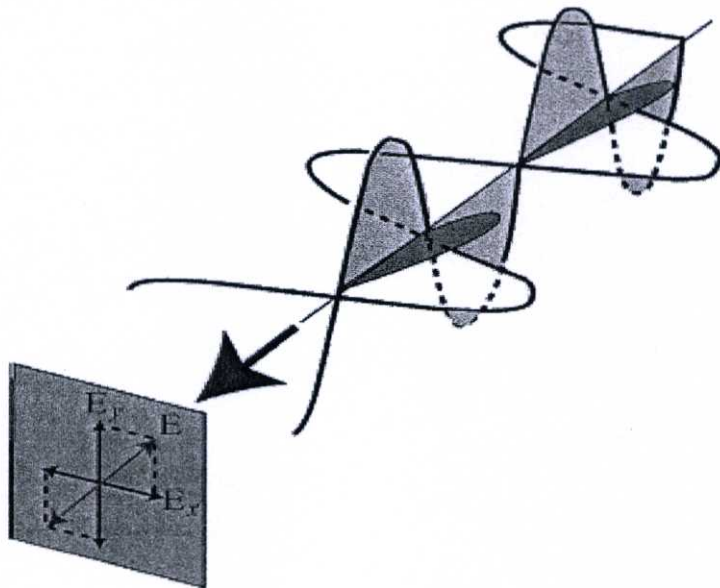
### 2.3 โพลาริเซชันของแสง ( Polarization of light )

โพลาริเซชันของแสง ( Polarization light ) [ 24 ] คือ การที่มีการสั่นของสนามเพียงระนาบเดียว โดยการสั่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของแสงจะมีทั้งสนามแม่เหล็ก และ สนามไฟฟ้า แต่ในที่นี้ระนาบของการสั่นแทนด้วยระนาบการสั่นของสนามไฟฟ้า สำหรับแสงที่อยู่ในธรรมชาติเป็นแสงที่ไม่โพลาริซ์ซึ่งมีระนาบการสั่นในทุกทิศทาง ถ้าต้องการทำให้แสงมีลักษณะเป็นโพลาริซ์จะต้องใช้ ผ่านตัวกรองแสงที่บังคับการสั่นให้เหลือทิศทางเดียว ( polarizing filter ) ที่ทำหน้าที่บังคับการสั่นของระนาบของแสงให้อยู่ในระนาบเดียว โดยจะยอมให้เฉพาะการสั่นที่เป็นระนาบเดียวกันกับแผ่นกรองได้ ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งจะเห็นว่าแม่แสงที่มีลักษณะที่มีการสั่นของสนามทุกทิศทุกทางเมื่อผ่านแผ่นกรองจะเหลือเฉพาะระนาบที่ขนานกับระนาบแผ่นกรองที่ยอมให้ผ่านมาได้ จะเห็นได้ว่าเมื่อนำเอาแผ่นกรองและให้ระนาบของแผ่นกรองตั้งฉากกันซึ่งจะตัดระนาบการสั่นของสนามไฟฟ้าที่เหลือผ่านไม่ได้ จากการใช้แผ่นกรองสองแผ่นมาทำมุมกันเป็นทำควบคุมปริมาณของแสงที่ผ่านออกมาได้



รูปที่ 2.4 การโพลาไรเซชันของแสงผ่านตัวกรองแสงที่บังคับการสั่นให้เหลือทิศทางเดียว

สำหรับการอธิบายการโพลาไรเซชันของแสง สามารถที่จะแยกองค์ประกอบของแสงที่ผ่านจากการกรองของแผ่นโพลาลอยได้เป็นระนาบใหม่คือ  $XY$



รูปที่ 2.5 องค์ประกอบของโพลาไรเซชัน

จากการสั่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของแสงที่เหลือเป็น โพลาริเซชัน แบ่งเป็นแต่ละประเภทได้จากการที่ องค์ประกอบของ โพลาริเซชัน ในแนว xy มีมุมทางเดินที่ต่างกัน สมการการเคลื่อนที่ของการ โพลาริเซชัน ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้เป็น

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

ได้ว่า

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

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

$\phi_x, \phi_y$  คือ ที่เป็นมุมในการเคลื่อนที่ของสนาม ( phase )

จากสมการที่ 2.39 ให้สามารถเขียนสมการเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าในแต่ละระนาบของการเคลื่อนที่ ได้เป็นดังนี้

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

โดยที่  $\bar{E}_x$  เป็นสนามที่สั่นในทิศทาง x ,  $\bar{E}_y$  เป็นสนามที่สั่นในทิศทาง y และ แทน  $kz-\omega t$  เป็น  $\tau$  เพื่อให้ง่ายต่อการแก้สมการ จากสมการที่ 2.41 จัดรูปใหม่และทำการกระจายเทอมของ  $\cos$  ในเทอมของการบวก แล้ว 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 2.42 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 2.43 คู่มกกันจะได้ดังนี้

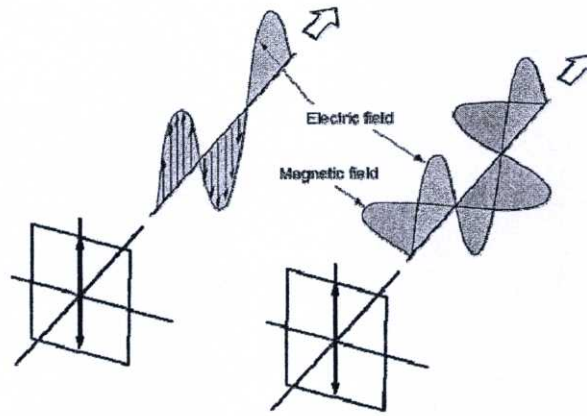
$$\frac{E_x^2}{E_{ox}^2} + \frac{E_y^2}{E_{oy}^2} - 2 \frac{E_x E_y}{E_{ox} E_{oy}} \cos(\phi) = \sin^2(\phi) \quad (2.43)$$

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

1. ความเป็นเชิงเส้นของโพลาริซ์ (Linear Polarized) คือ การสั่นของสนามไฟฟ้าในแนวเส้น กลับไปกลับมาซ้ำเดิม ลงบนระนาบ xy โดยเกิดจากความต่างเฟสของสนามในแกน x และ y ต่างกันเป็น  $\phi = 0$  และ  $\phi = \pi$  จากสมการที่ 2.44 เมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขนี้ เขียนได้ในรูปใหม่จากการสั่นของสนามของ x และ y ที่ว่า  $E_{ox} = E_{oy} = E_o$  ได้ว่า เมื่อแทนค่าของมุมเข้าไปในสมการที่ 2.44 จะได้เป็น

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

จะเห็นได้ว่า เป็นความสัมพันธ์ของสมการเส้นตรงเอง สามารถเขียนภาพประกอบการเคลื่อนที่ของการสั่นของสนามไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.6 ที่แสดงทิศทางของการสั่นของสนามไฟฟ้า

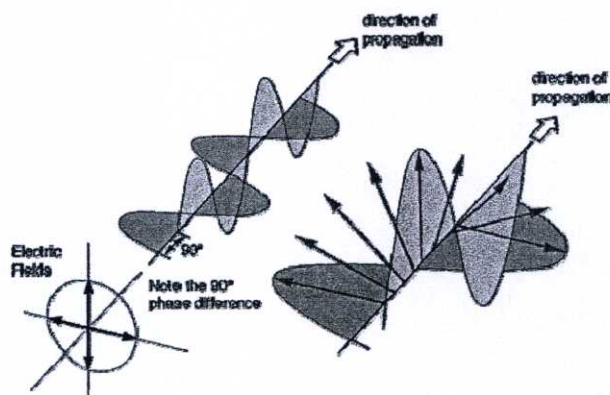


รูปที่ 2.6 รูปแบบการสั้นของสนามไฟฟ้าในกรณีที่มี  $\phi = 0$  และ  $\phi = \pi$

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

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

จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ของสมการอยู่ในรูปแบบของสมการวงกลม โดยมีการเคลื่อนที่แบบหมุนเป็นเกียรอบแกน  $z$  และ เมื่อมองในระนาบของ  $xy$  แล้วจะเห็นว่าเป็นลักษณะของวงกลม

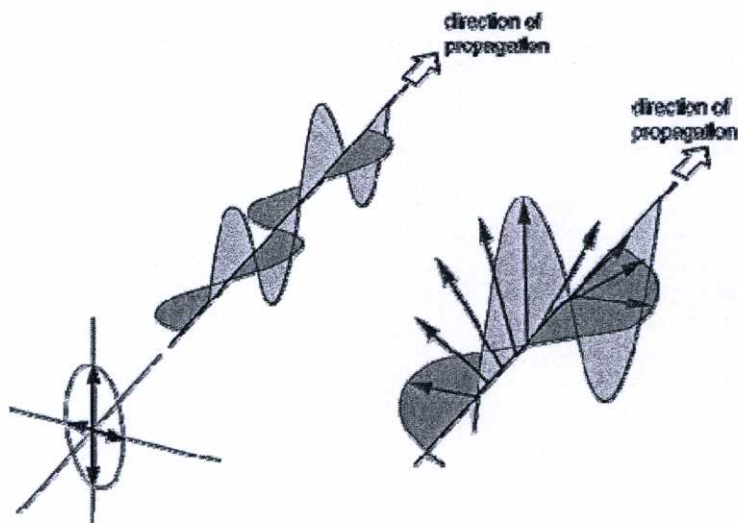


รูปที่ 2.7 รูปแบบการสั้นของสนามไฟฟ้าในกรณีที่มี  $\phi = \frac{\pi}{2}$  และ  $\phi = \frac{3\pi}{2}$

3. ลักษณะวงรีของโพลาไรซ์ (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 และจากการสั่นของสนามของ x และ y ที่ว่า  $E_{ox} = E_{oy} = E_o$  ได้ว่า เมื่อแทนค่าของมุมเข้าไปในสมการที่ 2.44 จะได้เป็น

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

โดยจะเห็นได้ว่ารูปแบบของสมการวงรีที่มีการหมุนรอบแกนของทิศทางเคลื่อนที่ที่สามารถแสดงการเคลื่อนที่ของการสั่นของสนามไฟฟ้าได้ดังนี้



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

4. ไม่มีรูปแบบการโพลาไรซ์ (Unpolarized) คือ เป็นรูปแบบการสั่นแบบการสุ่มโพลาไรซ์ หรือ ไม่มีรูปแบบการสั่นของสนามที่แน่นอน อาจเป็นการสั่นแบบผสมก็ได้

## 2.4 โจนส์เมตริกซ์แคลคูลัส ( The Jones Matrix Calculus )

### โจนส์เวกเตอร์ ( Jones vector )

โจนส์เวกเตอร์ ( Jones vector ) [ 24 ] สำหรับสนามไฟฟ้าที่สั้นอยู่ในสองทิศทาง สามารถเขียนเวกเตอร์การสั้นของสนามไฟฟ้าให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ เมื่อ สมการสนามไฟฟ้าเป็น  $E_x$  และ  $E_y$  ที่มีทิศทางเคลื่อนที่ในทิศทางของ  $z$  มีมุมต่างกันของทั้งสองเป็นมุม  $\delta_x$  และ  $\delta_y$  ซึ่งการเคลื่อนที่ของคลื่นเป็นไปตาม  $\omega t - kz$  ส่วน  $E_{0x}$  และ  $E_{0y}$  คือสั้นคลื่นสูงสุดสำหรับ  $x$  และ  $y$

$$E_x(z, t) = E_{0x} e^{i(\omega t - kz + \delta_x)} \quad (2.47a)$$

$$E_y(z, t) = E_{0y} e^{i(\omega t - kz + \delta_y)} \quad (2.47b)$$

จากสมการข้างต้น ไม่คิดการเคลื่อนที่ของคลื่น  $\omega t - kz$  นำมาเขียนใหม่ได้ว่า

$$E_x = E_{0x} e^{i\delta_x} \quad (2.48a)$$

$$E_y = E_{0y} e^{i\delta_y} \quad (2.48b)$$

โดยจากสมการที่ 2.48 สามารถเขียนในรูปของเมตริกซ์ ได้เป็น

$$E = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{0x} e^{i\delta_x} \\ E_{0y} e^{i\delta_y} \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

การเขียนในรูปแบบเมตริกซ์นี้เรียกว่า โจนส์คอลัมน์เวกเตอร์ ( Jones column matrix ) หรือ โจนส์เวกเตอร์ ( Jones vector ) ในการเขียนต้องอาศัยกฎมือขวาด้วย Jones vector จะช่วยให้สามารถมองภาพการเคลื่อนที่ของระนาบการโพลาไรซ์ให้ง่ายขึ้น

ในการศึกษาคุณสมบัติของแสงสิ่งที่จะต้องจำเป็นอย่างยิ่งก็คือความเข้ม ( I ) โดยสามารถหาความเข้มของสนามไฟฟ้าของแสงได้จากโจนส์เวกเตอร์ โดยสมการที่ได้จะทำการทำให้เป็นมาตรฐาน ( Normalization ) ก่อน โดยจะเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$I = E_x E_x^* + E_y E_y^* \quad (2.50)$$

หรือ เขียนในรูปแบบของเมตริกซ์ ได้เป็น

$$I = \begin{bmatrix} E_x^* & E_y^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

โดยในรูปแบบของเมตริกซ์สามารถได้ใหม่เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจ การเปลี่ยนคอลัมน์ให้อยู่ในรูปของแถวคอลัมน์ แล้ว คอนจูเกต (Conjugate) โดยแทนด้วย

$$E^\dagger = \begin{bmatrix} E_x^* & E_y^* \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

เขียนใหม่ในรูปแบบที่ง่ายได้เป็น

$$I = E^\dagger E \quad (2.53)$$

สมการความเข้มสนามได้จาก

$$E_{0x}^2 + E_{0y}^2 = I = E_0^2 \quad (2.54)$$

เมื่ออยู่ในรูปของการทำให้เป็นมาตรฐาน ทำให้ได้ว่า  $E_0^2 = 1$  เช่นเดียวกับกับกรณีของโจนส์เวกเตอร์ ทำให้ได้ว่า

$$E^\dagger E = 1 \quad (2.55)$$

จากรูปแบบของโจนส์เวกเตอร์การทำให้เป็นมาตรฐาน เป็นเงื่อนไขในการพิจารณารูปแบบของการ  
 สันสนามไฟฟ้าโดยทำการพิจารณาความเป็นไปได้ที่เวกเตอร์การสันของสนามไฟฟ้าในระนาบ  $xy$  ที่เป็นไป  
 ได้ดังนี้

1. โพลาริซ์เชิงเส้นในแนวนอน (Linear horizontally polarized) สำหรับสถานะที่  $E_y = 0$

$$E = \begin{bmatrix} E_{0x} e^{i\delta_x} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

จากสมการโจนส์เวกเตอร์การทำให้เป็นมาตรฐานทำให้ได้ว่า  $E_{0x}^2 = 1$  โดยในที่นี้คิดเทอม  
 ของ  $e^{i\delta_x}$  ค่าของการเปลี่ยนแปลงเป็นศูนย์ ทำให้เขียนใหม่ได้เป็น

$$E = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

จากเมตริกซ์เพื่อให้เข้าใจการสันของสนามไฟฟ้าที่อยู่เฉพาะในทิศของแกน  $x$  โดยค่าใน  
 เมตริกซ์ สามารถบอกลักษณะของการสันของสนามไฟฟ้าว่าอยู่ในทิศทางใดได้บ้าง

2. โพลาริซ์เชิงเส้นในแนวตั้ง (Linear vertically polarized) สำหรับสถานะที่  $E_x = 0$  และ  
 $E_{0y}^2 = 1$

$$E = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

3. โพลาริซ์เชิงเส้นในแนว  $+45$  (Linear  $+\frac{\pi}{4}$  polarized) สำหรับสถานะที่  $E_x = E_y$  และ  
 $2E_{0x}^2 = 1$

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

4. โพลาริซ์เชิงเส้นในแนว  $-45$  (Linear  $-\frac{\pi}{4}$  polarized) สำหรับสถานะที่  $E_x = -E_y$  และ  
 $2E_{0x}^2 = 1$

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

5. โพลาริซเซชันแบบวงกลมเวียนขวา (Right-hand circular polarized) สำหรับสถานะที่

$$E_{0x} = E_{0y}, \quad \delta_y - \delta_x = +\frac{\pi}{2} \quad \text{และ} \quad 2E_{0x}^2 = 1$$

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ +i \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

6. โพลาริซเซชันแบบวงกลมเวียนซ้าย (Left-hand circular polarized) สำหรับสถานะที่

$$E_{0x} = E_{0y}, \quad \delta_y - \delta_x = -\frac{\pi}{2} \quad \text{และ} \quad 2E_{0x}^2 = 1$$

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

จากคุณสมบัติของเวกเตอร์  $AB = 0$  จะได้ว่าเวกเตอร์ทั้งสองตั้งฉากกัน หรือ ในกรณี  $A^\dagger B = 0$  ที่อยู่ในรูปแบบของโจนส์เวกเตอร์ที่กระทำต่อกันซึ่งในกรณีเดียวกันทั้งสองเวกเตอร์ตั้งฉากกัน โดยเวกเตอร์สถานะนำไปใช้ในสมการที่ 2.54 เมื่อแทนด้วย โพลาริซเซชันในแนวนอนเข้าไปได้ว่า

$$[1 \quad 0]^* \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (2.63a)$$

หรือ ในกรณีที่ โพลาริซเซชันแบบวงกลมเวียนขวา และ โพลาริซเซชันแบบวงกลมเวียนซ้าย เมื่อแทนในสมการ

$$[1 \quad +i]^* \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} = 0 \quad (2.63b)$$

สำหรับเงื่อนไขของการตั้งฉากกันของโจนส์เวกเตอร์เมื่อ  $E_1$  และ  $E_2$  เป็น

$$E_i^\dagger E_j = 0 \quad (2.64)$$

โดยสามารถเขียนสรุปสมการทั่วไปได้เป็น

$$E_i^\dagger E_j = \delta_{ij} \quad : i, j = 1, 2 \quad (2.65a)$$

เมื่อ  $\delta_{ij}$  คือ โครเน็คเคอร์เดลตา (the Kronecker delta) และ สามารถสรุปค่าของ  $\delta_{ij}$  สำหรับค่าของ  $i, j = 1, 2$  ต่างๆดังนี้

$$\delta_{ij} = 1 \quad : i = j \quad (2.65b)$$

$$\delta_{ij} = 0 \quad : i \neq j \quad (2.65c)$$

สำหรับความเข้มสูงสุดของตำแหน่งที่ไม่สัมพันธ์กัน เรียกว่า สโตกส์เวกเตอร์ (Stokes vectors) แต่สำหรับค่าที่มีความต่อเนื่องของสันคลื่น คือ โจนส์เวกเตอร์ โดยเวกเตอร์ โพลาริซเซชันในแนวนอน คือ  $E_H$  และ โจนส์เวกเตอร์ โดยเวกเตอร์ โพลาริซเซชันในตั้ง คือ  $E_V$

$$E_H = \begin{bmatrix} E_{ox} e^{i\delta_x} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad E_V = \begin{bmatrix} 0 \\ E_{oy} e^{i\delta_y} \end{bmatrix} \quad (2.66)$$

เมื่อ  $E_H$  และ  $E_V$  บวกกันของเวกเตอร์

$$E = E_H + E_V = \begin{bmatrix} E_{ox} e^{i\delta_x} \\ E_{oy} e^{i\delta_y} \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

จากสมการดังกล่าวที่อยู่ในรูปของ โพลาริซเซชันในแนว คือ โพลาริซเซชันแบบวงรี ของแสง สำหรับสองเวกเตอร์ที่ตั้งฉาก ตัวอย่างเมื่อ  $E_{ox} = E_{oy}$  และ  $\delta_x = \delta_y$

$$E = E_{\alpha} e^{i\delta_x} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

เมื่อ โจนส์เวกเตอร์ จากสมการ 2.68 เป็น โพลาริซเซชันเชิงเส้นในแนว -45 และ ผลรวมของ  $E_H$  และ  $E_V$  ของสมการที่ 2.57 และ 2.58 ได้เป็น

$$E = E_H + E_V = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.69)$$

สำหรับการรวมกัน ของ  $E_H$  และ  $E_V$  ของ โพลาริซเซชันเชิงเส้นแบบวงกลมเวียนขวา และ โพลาริซเซชันเชิงเส้นแบบวงกลมเวียนซ้าย เป็น

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} + \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} = \frac{2}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.70)$$

โดย สำหรับผลสรุปของ โจนส์เวกเตอร์ ที่เป็น โพลาริซเซชันแบบวงรี ในรูปทั่วไป สำหรับสอง โพลาริซเซชันแบบวงกลม เมื่อ  $a$  และ  $b$  เป็นสเกลลิ่งสูงสุด

$$E_+ = a \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \quad E_- = b \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} \quad (2.71)$$

สำหรับผลรวมของ โจนส์เวกเตอร์ ได้เป็น

$$E = E_+ + E_- = \begin{bmatrix} a+b \\ i(a-b) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

จากสมการที่ 2.73 เขียนให้อยู่ในรูปสมการ โดยมีมุมต่างเป็น  $\frac{\pi}{2}$

$$E_x = a+b \quad (2.73a)$$

$$E_y = (a-b)e^{i\pi/2} \quad (2.73b)$$

จากสมการที่ 2.74 ทำการเพิ่มแนวการเคลื่อน  $\omega t - kz$  ได้เป็น

$$E_x = (a+b)e^{i(\omega t - kz)} \quad (2.74a)$$

$$E_y = (a-b)e^{i(\omega t - kz + \pi/2)} \quad (2.74b)$$

เขียนในรูปของ เทอมที่เป็นจำนวนจริง

$$E_x(z, t) = (a+b)\cos(\omega t - kz) \quad (2.75a)$$

$$\begin{aligned} E_y(z, t) &= (a-b)\cos(\omega t - kz + \pi/2) \\ &= (a-b)\sin(\omega t - kz) \end{aligned} \quad (2.75b)$$

จากสมการที่ 2.76 เขียนใหม่เป็น

$$\frac{E_x(z, t)}{(a+b)} = \cos(\omega t - kz) \quad (2.76a)$$

$$\frac{E_y(z, t)}{(a-b)} = \sin(\omega t - kz) \quad (2.76b)$$

เมื่อยกกำลังสองสมการที่ 2.77 และ บวกกัน ดังสมการผลสรุป

$$\frac{E_x^2(z, t)}{(a+b)^2} + \frac{E_y^2(z, t)}{(a-b)^2} = 1 \quad (2.77)$$

สมการดังกล่าวจะเห็นได้ว่าเป็นสมการในรูปแบบของวงรีที่รู้จัก สำหรับการสั้นของสนามไฟฟ้าที่  
ระนาบของวงรีกำหนด โดยเทอมของ  $a+b$  และ  $a-b$  ที่ทำการกำหนดรูปแบบของวงรี

### โจนเมตริกซ์สำหรับการหมุนโพลาไรซ์ ( Jones Matrices for Rotatable Polarized )

จากโจนเมตริกซ์สามารถหมุนแกนให้อยู่ในรูปทั่วไป สำหรับการเปลี่ยนไปของ สนามไฟฟ้าในการ หมุนแกนใหม่ ได้เป็น

$$E'_x = j_{xx}E_x + j_{xy}E_y \quad (2.78a)$$

$$E'_y = j_{yx}E_x + j_{yy}E_y \quad (2.78b)$$

สามารถเขียนในรูปของเมตริกซ์

$$\begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_{xx} & j_{xy} \\ j_{yx} & j_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (2.79a)$$

$$E' = JE \quad (2.79b)$$

เมื่อ

$$J = \begin{bmatrix} j_{xx} & j_{xy} \\ j_{yx} & j_{yy} \end{bmatrix} \quad (2.79c)$$

โดย  $J$  คือ โจนเมตริกซ์ (Jones matrix) ซึ่งมีความหมายมากในการเปลี่ยนไปของโพลาไรเซชัน สำหรับความสัมพันธ์ของโพลาไรเซชัน เป็น

$$\begin{aligned} E'_x &= p_x E_x \\ E'_y &= p_y E_y \end{aligned} \quad ; \quad 0 \leq p_{x,y} \leq 1 \quad (2.80a)$$

และสามารถเขียนในรูปของเมตริกซ์

$$\begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_x & 0 \\ 0 & p_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (2.80b)$$

เมื่อ โจนเมตริกซ์ สำหรับโพลาริเซชัน คือ

$$J_p = \begin{bmatrix} p_x & 0 \\ 0 & p_y \end{bmatrix} \quad (2.80c)$$

จาก โจนเมตริกซ์ สำหรับ โพลาริเซชันเชิงเส้นในแนวนอน ที่เป็นการสั่นในแนวแกน x ได้ว่า

$$J_{PH} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.81a)$$

และ โจนเมตริกซ์ สำหรับ โพลาริเซชันเชิงเส้นในแนวตั้ง ที่เป็นการสั่นในแนวแกน y ได้ว่า

$$J_{PV} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.81b)$$

โดยในรูปทั่วไปของสมการหมุนแกนโพลาริเซชันสำหรับ โจนเมตริกซ์โดยมุมที่หมุนไปเป็น  $\theta$  เขียนในรูปของสมการหมุนแกนของโพลาริเซชัน คือ

$$J' = J(-\theta)JJ(\theta) \quad (2.82a)$$

เมื่อเมตริกซ์สำหรับการหมุนแกนคือ

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.82b)$$

จากสมการที่ 2.83 เมื่อต้องการหมุนแกนโพลาริเซชัน โดยแทน  $J = J_p$  ได้ว่า

$$J' = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x & 0 \\ 0 & p_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.843)$$

เมื่อทำการคูณเมตริกซ์แล้วจะได้เมตริกซ์ของการหมุนแกนโพลาริเซชัน เป็น

$$J_p(\theta) = \begin{bmatrix} p_x \cos^2 \theta + p_y \sin^2 \theta & (p_x - p_y) \sin \theta \cos \theta \\ (p_x - p_y) \sin \theta \cos \theta & p_x \sin^2 \theta + p_y \cos^2 \theta \end{bmatrix} \quad (2.84)$$

สำหรับแนวคิด โพลาริเซชันเชิงเส้นในแนวนอน เมื่อแทน โจนเมตริกซ์ สำหรับโพลาริเซชันจากสมการที่ 2.82a เข้าไปทำให้ได้เมตริกซ์ของการหมุนของ โพลาริเซชันเชิงเส้นในแนวนอน เป็น

$$J_{pH}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (2.85a)$$

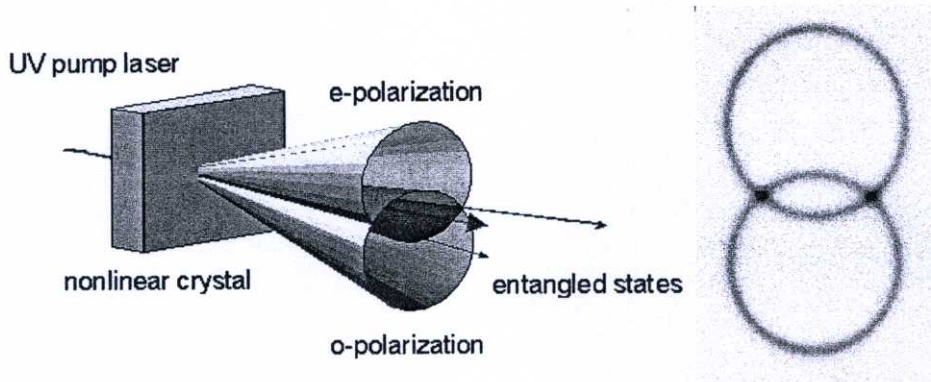
และกรณีที่เหมือนกัน สำหรับแนวคิด โพลาริเซชันเชิงเส้นในแนวตั้ง เมื่อแทน โจนเมตริกซ์สำหรับโพลาริเซชันจากสมการที่ 2.82b เข้าไปทำให้ได้เมตริกซ์ของการหมุนของ โพลาริเซชันเชิงเส้นในแนวตั้ง เป็น

$$J_{pV}(\theta) = \begin{bmatrix} \sin^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta \end{bmatrix} \quad (2.85b)$$

จากที่ได้กล่าวเกี่ยวกับ โจนเมตริกซ์ มีความสำคัญในการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของโพลาไรเซชัน ที่เกิดขึ้นในรูปแบบต่างๆ เมื่อสนามไฟฟ้าของแสงที่โพลาไรเซชัน เดินทางผ่านไปเนื้อสารทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพของโพลาไรซ์ไปได้ โดยในการตรวจสอบต้องอาศัย เมตริกซ์ช่วยในการพิจารณาสถานะของโพลาไรซ์ของแสงได้

## 2.5 คู่ความสัมพันธ์สถานะโฟตอน ( Entangled Photon State )

สำหรับครั้งแรกในการพิสูจน์คู่ความสัมพันธ์ทางแสงของเบลล์ (Bell's) โดยการทดลองของ เกลาเซอร์ (Clauser) และไซมอนี (Shimony) ในปี ค.ศ. 1978 สำหรับการทดลองที่ง่าย ๆ ในการพิสูจน์คู่ความสัมพันธ์ทางแสงคือ อนุภาคโพโดลสกายโรเซน (Einstein Podolsky Rosen , EPR) ในการสร้างเพื่อทำให้เกิด คู่ความสัมพันธ์สถานะทางควอนตัมของอนุภาคแสง (Quantum-Entangled photons) [ 9, 25 ] เป็นผลจากสำหรับความไม่เป็นเชิงเส้นของเนื้อสารทำให้เกิด สปอนตาเนียสพารามตริกควอนเวอร์ชัน (Spontaneous Parametric Down-Conversion , SPDC) ใน ผลึกแบบไบรีฟริงเจนท์ (Birefringent crystal) ความสัมพันธ์สถานะของโฟตอน (Photon) ทั้งสองที่อยู่รวมกันสิ่งที่สำคัญในการอธิบายสถานะโฟตอน ปรากฏการณ์ที่สามารถเห็นได้เมื่อให้สัญญาณเข้าไปในเนื้อสารที่ไม่ต่อเนื่อง (Nonlinear crystal) แล้วทำให้เกิดวงแหวนซ้อนกันขึ้นโดยปรากฏการณ์นี้ถูกอธิบายในรูปแบบของ ควอนตัมของแสง เรียกว่า คู่ความสัมพันธ์ของสถานะโฟตอน (Entangled Photon State) โดยทั้งสองวงเป็นคู่ความสัมพันธ์ สำหรับผลึกที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่เป็น  $\chi^{(2)}$  จะทำให้เกิด SHG สิ่งที่เกิดขึ้นคือ มีวงแหวนเกิดขึ้นซ้อนกัน 6 วงซ้อนกัน โดยมีสีของวงแหวน 3 สี ที่แทนด้วยความยาวคลื่นของแสงที่เกิดจาก  $\chi^{(2)}$  ความยาวคลื่นที่เหมือนกันที่แยกออกเป็นสองวงจากนั้นถูกเรียกว่าคู่ความสัมพันธ์ที่มีสถานะรวมกันแยกกันออกมาทำให้เห็นเป็นวงแหวนซ้อนกัน การทดลองดังกล่าวโดยใช้ ผลึกแบบ BBO (beta-barium borate , BBO) เป็นการทดลองแบบง่ายในการทำให้เกิดคู่ความสัมพันธ์ทางแสง เป็นทดลองในแบบ “ EPR-Bell states” การทดลองสามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 2.9



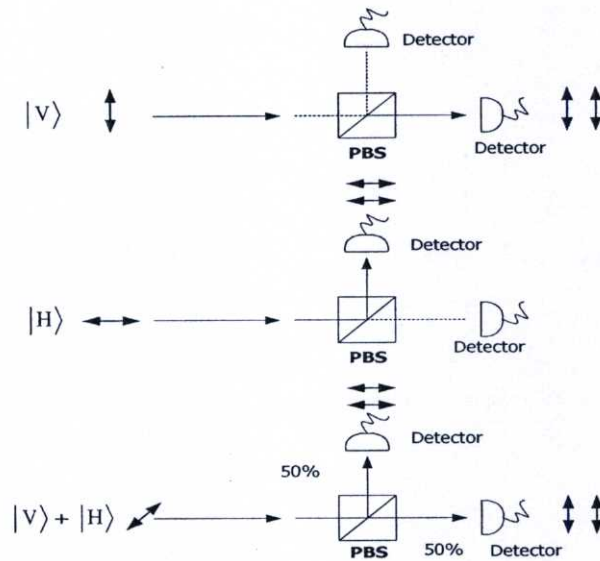
รูปที่ 2.9 แสดงการเกิดคู่ความเกี่ยวพันของสถานะโฟตอนสำหรับ BBO-crystal

คณิตศาสตร์ในการอธิบายความเกี่ยวพันของสถานะของอนุภาคแสงในรูปแบบทางควอนตัม ในทางฟิสิกส์ในการทำการวัดอนุภาคทางแสงครั้งที่ 1 จะส่งผลต่ออนุภาคทางแสงของตัวที่ 2 ไปด้วย จากการทดลองผลที่ได้เมื่อทำการวัดอนุภาคใดแล้วอีกตัวจะถูกทำลายสถานะไปด้วย โดยทั้งสองมีความเกี่ยวพันกัน เรียกว่า คู่ความเกี่ยวพันของสถานะโฟตอน (Entanglement Photons) สำหรับรูปแบบทั่วไปในการอธิบายพฤติกรรมในธรรมชาติของอนุภาคทางแสงสองสถานะในการเปลี่ยนแปลงเมื่อเข้าไปในผลึกของสารที่เป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้นสามารถเขียนฟังก์ชันคลื่น จาก โจนเมตริกซ์ สามารถเขียนในแบบของทฤษฎีทางควอนตัมสำหรับการโพลาไรซ์ 1 โฟตอน เป็นตามแนวนอน ( Horizontal ,  $|H\rangle$ ) และ แนวตรง (Vertical,  $|V\rangle$ ) ในการส่งระหว่างของ Alice (ผู้ส่งหรือผู้รับ) ถึง Bob (ผู้รับหรือผู้ส่ง) โดยสามารถเขียนสองฟังก์ชันที่ตั้งฉากเป็น  $|\psi_+\rangle$  และ  $|\psi_-\rangle$  มีค่าที่ต่อเนียงร่วมกันของ  $|H\rangle$  และ  $|V\rangle$  ดังรูปที่ 12 โดยค่าของการวัดเป็น “ bit 0 ” และ “ bit 1 ”

ควอนตัมบิต [ 9, 25 ]

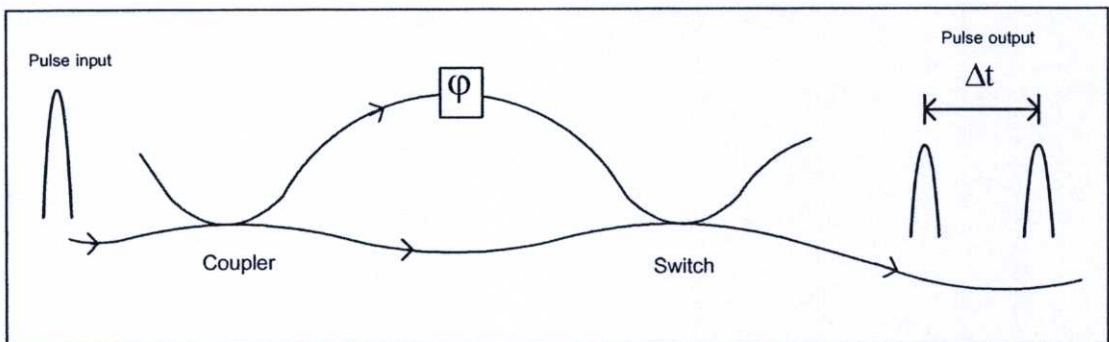
$$|\psi_+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|H\rangle + |V\rangle) \quad (2.86a)$$

$$|\psi_-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|H\rangle - |V\rangle) \quad (2.86b)$$



รูปที่ 2.10 แผนผังแสดงรูปแบบของการเกิดคู่ความเกี่ยวพันของสถานะโฟตอนเดี่ยว (Single photon entangled)

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสร้างการเกิดคู่ความเกี่ยวพันของสถานะโฟตอนในโพรงสั่นพรงวงแหวนขนาดเล็กโดยการสร้างพัลส์คู่เพื่อเป็นอินพุทของโพรงสั่นพรงวงแหวนโดยอาศัย Mach-Zehnder [9] ของเส้นใยแก้วนำแสง เพื่อสร้างให้เกิดพัลส์คู่ที่โดยพัลส์ที่สองห่างกันเป็นเวลา ที่ถูกกำหนดโดย  $\phi$  สามารถเรียนได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แผนผังการสร้าง Mach-Zehnder โดยใช้ใยแก้วนำแสง

จากผลที่ได้จาก Mach-Zehnder โดยการควบคุมการหมุนของการโพลาไรซ์สถานะที่ได้ยังคงเดิม แต่ถูกแบบออกเป็นสองพัลส์ที่เวลาที่ต่างกัน สามารถเขียนสถานะได้ดังนี้

$$|\Phi\rangle_p = |1, H\rangle_s |1, H\rangle_i + |2, H\rangle_s |2, H\rangle_i \quad (2.87)$$

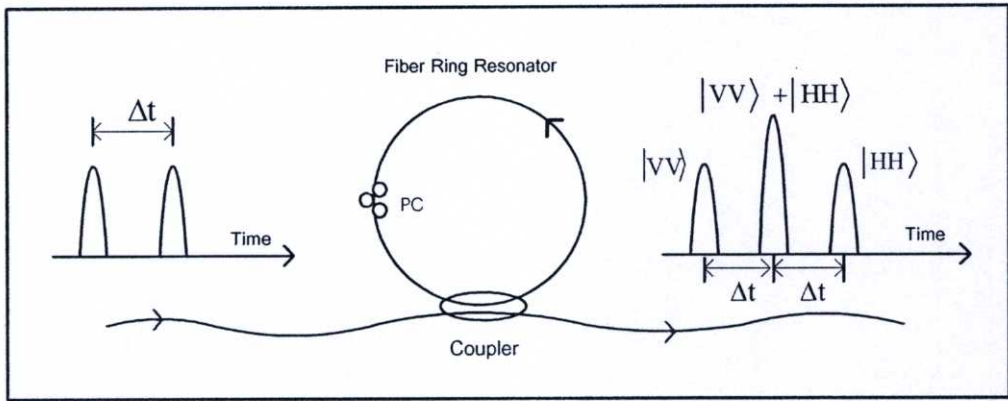
โดยที่  $|k, H\rangle$ ,  $k$  เป็นตำแหน่งเลขของเวลา ( 1 หรือ 2 ) เมื่อสถานะแสดงถึงโพลาไรซ์แนวราบ ( Horizontal, H) หรือ แนวตั้ง ( Vertical, V ) สำหรับการเปลี่ยนแปลงของสถานะ  $V$  ภายในโพรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า  
 แหวน  $|k, H\rangle \rightarrow |k, H\rangle + t_2 \exp(i\phi) |k+1, V\rangle + r_2 \exp(i_2\phi) |k+2, H\rangle + r_2 t_2 \exp(i_3\phi) |k+3, V\rangle$  สามารถ  
 สมการการเปลี่ยนแปลงได้เป็น

$$\begin{aligned} |\Phi\rangle &= [|1, H\rangle_s + \exp(i\phi_s) |2, V\rangle_s] \times [|1, H\rangle_i + \exp(i\phi_i) |2, V\rangle_i] \\ &\quad + [|2, H\rangle_s + \exp(i\phi_s) |3, V\rangle_s] \times [|2, H\rangle_i + \exp(i\phi_i) |2, V\rangle_i] \\ &= [|1, H\rangle_s |1, H\rangle_i + \exp(i\phi_i) |1, H\rangle_s |2, V\rangle_i] + \exp(i\phi_s) |2, V\rangle_s |1, H\rangle_i + \exp[i(\phi_s + \phi_i)] |2, V\rangle_s |2, V\rangle_i \\ &\quad + |2, H\rangle_s |2, H\rangle_i + \exp(i\phi_i) |2, H\rangle_s |3, V\rangle_i + \exp(i\phi_s) |3, V\rangle_s |2, H\rangle_i + \exp[i(\phi_s + \phi_i)] |3, V\rangle_s |3, V\rangle_i \end{aligned} \quad (2.88)$$

โดยทั้งสองตำแหน่งที่สอดคล้องกันในตอนแรก สามารถกระจายรูปแบบได้ใหม่เป็นเทอมที่สี่และห้าตามลำดับ สำหรับในกรณีที่เป็นคู่ความสัมพันธ์สถานะโพลาไรซ์ได้เป็น

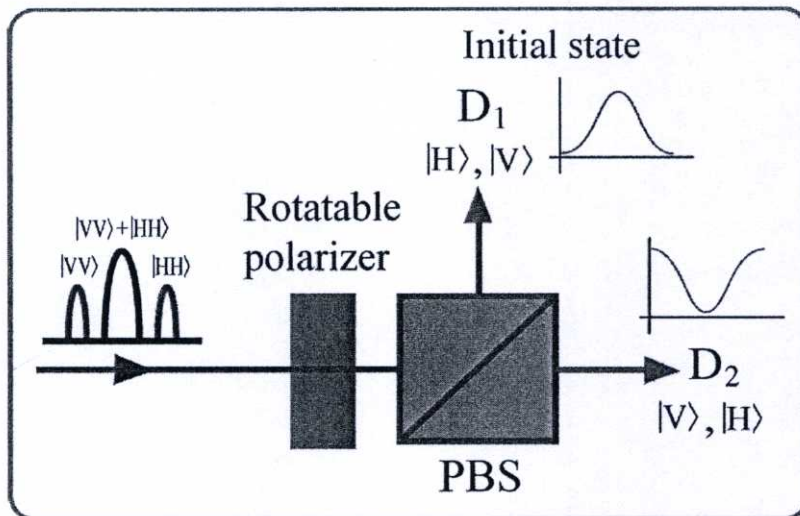
$$|\Phi\rangle = |2, H\rangle_s |2, H\rangle_i + \exp[i(\phi_s + \phi_i)] |2, V\rangle_s |2, V\rangle_i \quad (2.89)$$

ดังรูปที่ 2.12 เป็นการทดลองผลที่เกิดจากใยแก้วที่ทำจากวัสดุที่เป็นเชิงเส้นทำให้ปรากฏการณ์ทางแสงที่เรียกว่า ปรากฏการณ์ของเคอร์ (Kerr effect) โดยใช้ใยแก้วที่มีแกนขนาดเล็กเพื่อทำให้เกิดขึ้น และจะต้องให้ความเข้มของสัญญาณที่มีความเข้มที่สูงเพื่อทำให้เกิดปรากฏการณ์ของเคอร์ขึ้น โดยขนาดของแกนใยแก้วมีผลทำให้เกิดจึงต้องมีขนาดของแกนที่เล็กมากเพื่อทำให้เกิด



รูปที่ 2.12 แผนผังการเกิดคู่ความสัมพันธ์ของโฟลาไรสำหรับการทดลองโดยใช้โพล่งสั้นพลังวงแหวน

สำหรับการทดลองเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของสถานะของโฟตอนที่รวมกัน โดยใช้ PBS สำหรับการแยกสถานะทั้งสองออกจากกัน เมื่อให้สัญญาณที่ได้ผ่านเข้าไปใน PBS สัญญาณจะถูกแยกทั้งสองออกจากกัน สามารถเขียนแผนภาพประกอบได้ดังรูปที่ 2.13 อาศัยการลักษณะของสนามไฟฟ้าเพื่อทำการแยกองค์ประกอบออกจากกัน สำหรับตัวอย่างในการแยกองค์ประกอบทั้งสองออกจากกันเป็นการรวมกันของ  $|H\rangle$  และ  $|V\rangle$  ซึ่งเป็นสัญญาณที่ทำการวิเคราะห์



รูปที่ 2.13 แผนผัง PBS แยกองค์ประกอบของ  $|H\rangle$  และ  $|V\rangle$

จากรูปเมื่อให้สัญญาณที่มีส่วนประกอบของ  $|H\rangle$  และ  $|V\rangle$  ที่รวมกันอยู่ในที่นี้ การปรับมุมของโพลาไรเซอร์ (Rotatable polarizer) เป็นตัวควบคุมปริมาณของ  $|H\rangle$  และ  $|V\rangle$  ที่จะผ่านเข้าไปใน PBS เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความเข้มของแสงที่ออกมาในสองทิศทาง ซึ่งเมื่อตัวใดตัวหนึ่งมากเกินไปอีกตัวจะลดลง สัมพันธ์กัน โดยผลรวมที่ได้จะเท่ากับความเข้มที่ให้เข้าไป สำหรับ D1 และ D2 เป็นตัววัดความเข้มของแสงที่ถูกแยกออกจาก PBS

โดยสามารถสรุปคู่ความเกี่ยวพันของสถานะโฟตอนสองตัวสำหรับโพลาไรซ์ สำหรับการวิเคราะห์สถานะของสองโฟตอนที่โพลาไรซ์ต้องอาศัย PBS ในการวิเคราะห์ปริมาณของ  $|H\rangle$  และ  $|V\rangle$  ส่วนงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาการเกิดปฏิริยาของสองโฟตอน สามารถอธิบายโดยอาศัยทฤษฎี Bells' states ในการแสดงสถานะโฟตอน ซึ่งสามารถเขียนสถานะโดยสรุป 2 รูปแบบดังนี้คือ

1. คู่ที่เกิดจากรวมกันแบบเหมือนกัน หรือ คู่ที่การจากรวมกันแบบเสริม ( perfect positive correlation )

$$|\Phi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H_s H_i\rangle \pm |V_s V_i\rangle) \quad \text{หรือ} \quad |\Phi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\leftrightarrow\leftrightarrow\rangle \pm |\Downarrow\Downarrow\rangle) \quad (2.90a)$$

2. คู่ที่เกิดจากรวมกันแบบต่างกัน หรือ คู่ที่การหักล้างกัน ( perfect negative correlation )

$$|\Psi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H_s V_i\rangle \pm |V_s H_i\rangle) \quad \text{หรือ} \quad |\Psi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\leftrightarrow\Downarrow\rangle \pm |\Downarrow\leftrightarrow\rangle) \quad (2.90b)$$

สำหรับสมการ สามารถเขียนในรูปแบบของเวกเตอร์ทิศทางการสั้นของโฟตอนแทนได้ เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจในการศึกษา H แทนการสั้นของโฟตอนในแนวนอน และ V แทนการสั้นของโฟตอนในแนวตั้ง หรือ อาจมีองค์ประกอบอื่นๆ ได้อีก

โดยจากสถานะของโพลาไรเซชัน สามารถแบ่งออกได้ 3 แบบด้วย โดยเป็นรูปแบบของการรวมกันของสองระนาบโพลาไรซ์ที่ตั้งฉากกัน สถานะรวมกันอยู่ก็ได้ สำหรับคุณสมบัติดังกล่าวเปรียบเทียบกับกับการสปรินของอิเล็กตรอนที่รวมกันอยู่ สามารถสรุปสถานะทั้งสองที่อยู่ร่วมกันในแต่ละแบบตามตารางที่

ตารางที่ 2.1 แสดงสถานะสำหรับ Bells' states

2-Photon State	Bells' states
Horizontally และ vertically	$ \Phi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}( \leftrightarrow\leftrightarrow\rangle \pm  \Downarrow\Downarrow\rangle)$ or $ \psi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}( \leftrightarrow\Downarrow\rangle \pm  \Downarrow\leftrightarrow\rangle)$
$+\frac{\pi}{4}$ ( $+45^\circ$ ) และ $-\frac{\pi}{4}$ ( $-45^\circ$ )	$ \Phi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}( \nearrow\nearrow\rangle \pm  \searrow\searrow\rangle)$ or $ \psi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}( \nearrow\searrow\rangle \pm  \searrow\nearrow\rangle)$
Right circular และ Left circular	$ \Phi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}( RR\rangle \pm  LL\rangle)$ or $ \psi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}( RL\rangle \pm  LR\rangle)$

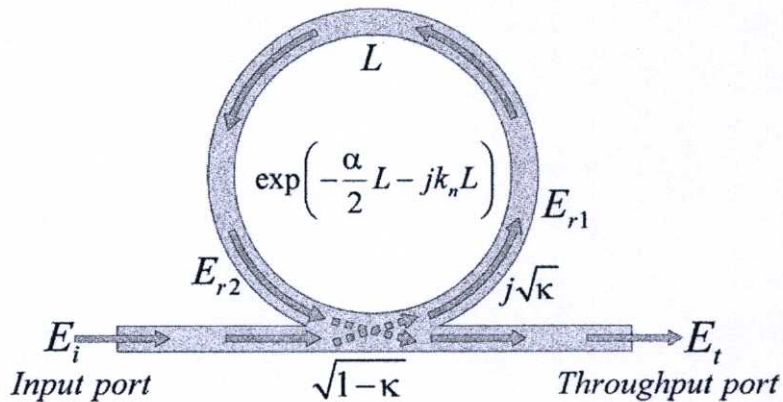
2.6 โพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็ก (Micro Ring Resonator)

โครงร่างอย่างง่ายของโพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็ก (Micro Ring Resonator) [ 26 ] เดี่ยวที่มีคัปเปิลอร์เพียง 1 ตัวแสดงดังรูปที่ 2.16 ซึ่งมีเส้นรอบวงของวงแหวนเป็น  $L$  ( $L = 2\pi R$ ; รัศมีคือ  $R$ ) สัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงกำลังคือ  $K$  สัมประสิทธิ์การลดทอนความเข้มแสงของวงแหวนคือ  $\alpha$  ค่าคงที่ของการแพร่กระจายคลื่น (Wave propagation constant) คือ  $k_n$  การวิเคราะห์อุปกรณ์ที่แสดงดังรูปข้างล่าง จะอธิบายการคัปปลิงของแสงที่เข้าและออกจากโพรงสั้นพ้อง ในเทอมความสัมพันธ์ของการแยกลำแสงทั่วไป โดยมีสัมประสิทธิ์การคัปปลิงตามเส้นทางทะลุผ่าน ( $E_i \rightarrow E_t, E_{r2} \rightarrow E_{r1}$ ) มีค่าเป็น

$$y = \sqrt{(1 - \gamma)(1 - K)}$$

และตามเส้นทางทแยงมุม ( $E_i \rightarrow E_{r1}, E_{r2} \rightarrow E_t$ ) มีค่าเป็น

$$r = j\sqrt{(1 - \gamma)K}$$



รูปที่ 2.14 โพรงสั้นพ้องวงแหวนวงเดี่ยว

ความสัมพันธ์สนามไฟฟ้าส่งผ่าน  $E_t$  และอินพุต  $E_i$  สามารถหาได้ดังนี้

$$E_t = (1 - \gamma)^{1/2} \times [E_i \cdot \sqrt{1 - \kappa} + j \cdot E_{r2} \sqrt{\kappa}] \quad (2.91)$$

$$E_{r1} = (1 - \gamma)^{1/2} \times [j \cdot E_i \cdot \sqrt{\kappa} + E_{r2} \cdot \sqrt{1 - \kappa}] \quad (2.92)$$

จากทฤษฎีการส่งผ่านแสง (Light transmission theory) ในระบบเชิงแสงที่เป็นเชิงเส้น สนามไฟฟ้าของคลื่นแสงที่เคลื่อนที่ไปได้ในแต่ละส่วนระยะทางอธิบายได้ด้วยสมการ

$$E_{segment} = E_A \cdot \exp\left(-\frac{\alpha_{segment}}{2} \cdot L_{segment} - j \cdot k_n \cdot L_{segment}\right) \quad (2.93)$$

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

$$E_{r2} = E_{r1} \cdot \exp\left(-\frac{\alpha}{2} \cdot L - j \cdot k_n \cdot L\right) \quad (2.94)$$

ในที่นี้  $k_n = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda}$  และ  $\gamma$  แทนสัมประสิทธิ์การสูญเสียความเข้มแสงอินพุตของคัปเปิลอร์ และ  $n_{eff}$

คือ ดัชนีหักเหประสิทธิผล (effective refractive index) โดยใช้สมการ (2.92), (2.93) และ (2.94) สามารถคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอน  $E_t/E_i$  ได้เป็น

$$\frac{E_t}{E_i} = (1 - \gamma)^{1/2} \times \left[ \frac{\sqrt{1 - \kappa} - (1 - \gamma)^{1/2} \cdot \exp\left(-\frac{\alpha}{2} \cdot L - j \cdot k_n \cdot L\right)}{1 - (1 - \gamma)^{1/2} \cdot \sqrt{1 - \kappa} \cdot \exp\left(-\frac{\alpha}{2} \cdot L - j \cdot k_n \cdot L\right)} \right] \quad (2.95)$$

เพื่อให้ง่ายในการแก้สมการจะกำหนดพารามิเตอร์ตัวใหม่ดังนี้

$$\begin{aligned} D &= (1 - \gamma)^{1/2} \\ x &= D \cdot \exp\left(-\frac{\alpha}{2} \cdot L\right) \\ y &= \sqrt{1 - \kappa} \\ \phi &= k_n \cdot L \end{aligned} \quad (2.96)$$

ความสัมพันธ์ความเข้มแสงของพอร์ตเอาต์พุต( $I_t$ ) เทียบกับพอร์ตอินพุต( $I_i$ ) กำหนดได้เป็น

$$\frac{I_t}{I_i} = \left| \frac{E_t}{E_i} \right|^2 = D^2 \cdot \left[ 1 - \frac{(1 - x^2) \cdot (1 - y^2)}{(1 - x \cdot y)^2 + 4 \cdot x \cdot y \cdot \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)} \right] \quad (2.97)$$

แต่สำหรับในการทดลองจะวัดสัญญาณของความเข้มของแสงที่ออกมาเท่า จากสมการที่ 2.94 เป็นการวัดที่เกิดจากการสูญเสียที่เกิดจากอุปกรณ์ที่ทำการกรองของโพรงสั้นพ้องวงแหวนวงเดียว ที่สัญญาณแสงผ่านเข้าไป สำหรับสัญญาณความเข้มที่ผ่านออกมาเขียนสมการได้ใหม่เป็น

$$I_t = D^2 \cdot \left[ 1 - \frac{(1-x^2) \cdot (1-y^2)}{(1-x \cdot y)^2 + 4 \cdot x \cdot y \cdot \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)} \right] \cdot I_i \quad (2.98)$$

จากสมการที่ 2.98 เป็นสมการสุดท้ายสำหรับการส่งผ่านของโพรงสั้นพ้องวงแหวนที่เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เป็นผลจากการแก้สมการของสนามไฟฟ้าภายในท่อนำคลื่น

## 2.7 พัลส์เกาส์เซียน (Gaussian pulse) และ พัลส์โซลิตอน (Soliton pulse)

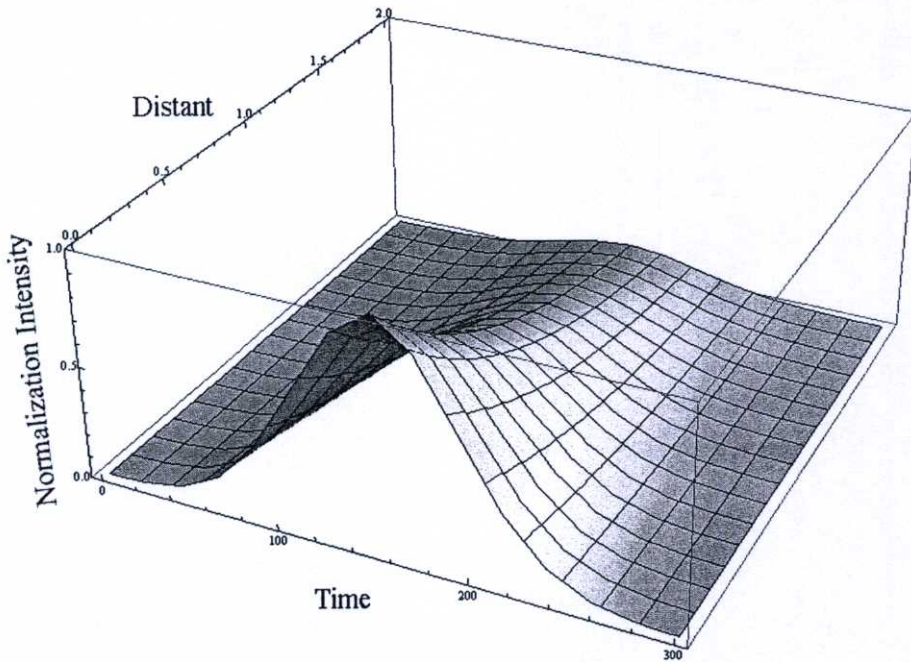
สำหรับสัญญาณในการสร้างแบบจำลองในงานวิจัยนี้มี 2 แบบด้วยกันคือ พัลส์เกาส์เซียน และ พัลส์โซลิตอน โดยทั้งสองแบบมีความแตกต่างกัน

### พัลส์เกาส์เซียน (Gaussian pulse)

โดยพัลส์เกาส์เซียน (Gaussian pulse) [ 23 ] เป็นรูปแบบหนึ่งการส่งสัญญาณทั่วไปการสื่อสารทางแสง เป็นการให้สัญญาณในรูปแบบของพัลส์ในรูปของเวลาที่ห่างกันเพื่อรหัสใช้ในการสื่อสารทางแสง โดยลักษณะของพัลส์เป็นแบบระฆังคว่ำลง โดยมีแอมพลิจูดสูงสุดอยู่ตรงกลาง สำหรับในงานวิจัยในข้างต้นใช้พัลส์เกาส์เซียนในการทำการศึกษาในการเกิด SHG โดยอาศัยปรากฏการณ์เคอร์เพียงอย่างเดียว โดยสามารถใช้สมการคณิตศาสตร์สำหรับการกระจายของเกาส์เซียนได้ดังนี้

$$E_{in}(t) = E_0 \exp^{j\phi_0(t)} \quad (2.99)$$

โดย  $E_0$  เป็นแอมพลิจูดสูงสุดของการกระจาย ส่วนในเทอมของเอ็กโพเนนเชียลจะเป็นการกระจายของกราฟในรูปแบบของระฆังคว่ำลง โดยจากรูปที่ 2.17 เป็นการกระจายสำหรับแกนของเวลาที่เป็นลักษณะของระฆังคว่ำลง ส่วนแกนระยะทางเป็นผลที่เกิดจากการลดทอนที่เกิดจากการส่งสัญญาณเข้าไปในสายสัญญาณ ที่เป็นผลทำให้แอมพลิจูดของคลื่นลดลงทำให้ความคมสัญญาณลดลง ความเข้มเกิดการกระจายออก โดยผลเป็นผลของการสูญเสียและการลดทอนของเนื้อสารที่ใช้ทำใยแก้วโดยเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นแอมพลิจูด และ ความคมของสัญญาณลดลงจะกระจายออก โดยพัลส์นี้เป็นคุณสมบัติของเกาส์เซียนสามารถแสดงได้ดังรูป 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะของพัลส์แก๊สเขียนตามระยะทาง

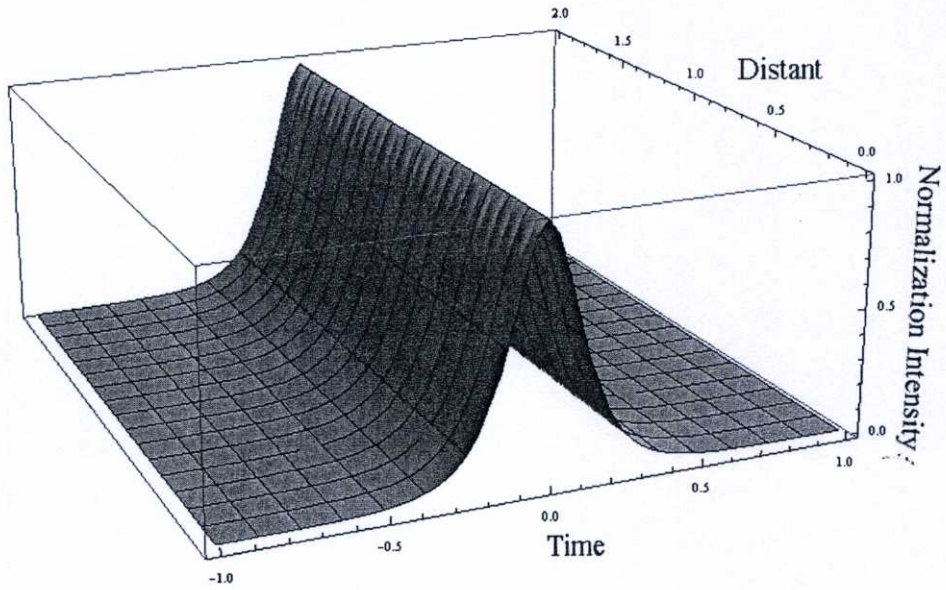
### พัลส์โซลิตอน (Soliton pulse)

สำหรับสมการทางคณิตศาสตร์ของพัลส์โซลิตอนเป็นผลจากเทอมความไม่เป็นเชิงเส้นของเนื้อสารทำให้เกิดการรวมกันของเฟสที่ต่างกันในพัลส์ขึ้น (self-phase modulation และ cross-phase modulation) [20 , 21 , 27] ผลดังกล่าวกับเป็นผลดีของพัลส์คือลักษณะของโซลิตอนที่มีแอมพลิจูดคงที่เมื่อส่งไปในสายสัญญาณไม่มีการสูญเสียเกิดขึ้น สามารถเขียนสมการสำหรับพัลส์โซลิตอนได้ดังนี้

$$E_m(t) = A \operatorname{sech} \left[ \frac{T}{T_0} \right] \exp \left[ \left( \frac{z}{2L_D} \right) - i\omega_0 t \right] \quad (2.100)$$

จากสมการดังกล่าวสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ของการเดินทางของโซลิตอนภายในใยแก้วนำแสงได้ดังรูปที่ 2.18 จะเห็นได้ว่าสัญญาณยังคงรักษาความสูงของแอมพลิจูดตามเงื่อนไขของสมการตามแกนความยาวที่เป็นผลจากเทอมของ  $\exp\left(\frac{z}{2L_D}\right)$  ตามระยะทางของ  $L_D$  แอมพลิจูดจะยังคงเดิมเหมือนเริ่มต้น สำหรับเทอมของ

$\text{sech}\left[\frac{T}{T_0}\right]$  เป็นการกระจายในแกนของเวลาที่เป็นผลจากการพิจารณาเทอมของความไม่เป็นเชิงเส้นของแสงเข้าไปเกิดการรวมกันของเฟสที่ต่างกันในพัลส์ เมื่อเขียนกราฟสามมิติในการอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะของพัลส์โซลิตอนตามระยะทาง

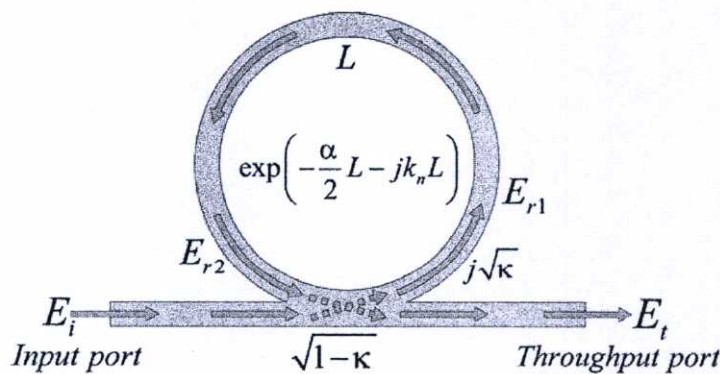
### บทที่ 3

## ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

สำหรับขั้นตอนการดำเนินงานนี้เริ่มจากการสร้างแบบจำลองของวงแหวนในการกรองสำหรับการสร้างความไม่เป็นเชิงเส้นของแสงภายในแบบจำลองของวงแหวนขนาดเล็กที่ทำให้เกิดความยาวคลื่นต่างๆ ใช้แบบจำลองวงแหวนขนาดเล็กกรองสัญญาณที่ได้ให้เหลือเฉพาะ SHG ที่ต้องการ สร้างแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์สถานะของการโพลาไรซ์ของแสงและแยกโดยใช้ PBS ในการเช็คสถานะของสัญญาณแสงที่ได้ สำหรับพัลส์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองมีด้วยกันสองแบบคือ พัลส์เกาส์เซียน และ พัลส์โซลิตอน โดยในขั้นแรกในการทำการศึกษาก็จะใช้พัลส์เกาส์เซียนในการศึกษาก่อน เพื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการสร้างโดยใช้พัลส์โซลิตอน สำหรับเป้าหมายสูงสุดของงานวิจัยคือสามารถสร้างสัญญาณที่ได้จากการกรองของวงแหวนกำหนดขนาดเล็กในรูปแบบของความยาวคลื่นแบบต่อเนื่องได้

### 3.1 การศึกษาโพรงสั่นพ้องวงแหวนขนาดเล็กวงแหวนขนาดเล็กโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

โพรงสั่นพ้องวงแหวนขนาดเล็กแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงเกิดจากการนำใยแก้วชนิดโหมดเดียว ประกอบรวมกับคัปเปิลอร์ใยแก้วนำแสง ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โมเดลโพรงสั่นพ้องวงแหวนขนาดเล็กแบบวงแหวนที่นำคลื่นที่ประกอบด้วยคัปเปิลอร์

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกส่งเข้าส่งเข้าทางปลายท่อนำคลื่นด้านหนึ่งของโพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็กผ่านบริเวณคัปปลิงของคัปเปิลอร์โพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็ก คลื่นแสงถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนตามอัตราการแบ่งกำลังแสงของคัปเปิลอร์  $\kappa$  แสงส่วนแรกถูกส่งผ่านไปยังปลายอีกด้านของใยแก้วนำแสงเป็นสัญญาณเอาต์พุต แสงส่วนที่สองถูกส่งเข้าสู่วงแหวนซึ่งมีความยาว  $L$  แล้วจึงเดินทางผ่านเข้าสู่บริเวณคัปปลิงของคัปเปิลอร์อีกครั้ง แสงถูกส่งหมุนวนต่อไปเรื่อยๆจนกระทั่งถูกลดทอนภายในใยแก้วจนหมด

สมมติว่าไม่มีการสูญเสียของคัปเปิลอร์และไม่เกิดการสูญเสียในใยแก้วนำแสงที่เป็นโพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็กแบบวงแหวน (ปกติมีการสูญเสียน้อยมากในท่อนำคลื่นประมาณ 0.2 เดซิเบลต่อกิโลเมตร) สนามไฟฟ้า  $E_1$  และ  $E_{out}$  ที่ประกอบด้วยสนามส่วนการส่งผ่านและสนามที่วนรอบภายในวงแหวนขนาดเล็กแสงสามารถเขียนได้เป็น

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

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

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

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  $\phi_L$  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  $\lambda_0$  คือ ความยาวคลื่นของแสงเดินทางในสุญญากาศ และ  $A_{eff}$  คือ พื้นที่ของแกนยังผลของท่อนำคลื่น แทนสมการที่ (3.2) ในสมการที่ (3.1) และเขียนเป็นรูปแบบของสมการการวนซ้ำ (iterative equation) ที่ขึ้นกับเวลาได้เป็น

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

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” แทนจำนวนการวนรอบดูภายในวงแหวนที่นำกลี้อ

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

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

หรือ

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

สมการ (3.7) และ (3.11) คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพลวัตแบบไม่เป็นเชิงเส้น สำหรับใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้ จะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโพรงสั่นพ้องวงแหวนขนาดเล็กแบบวงแหวนคือ ความยาววงแหวน ( $L$ ) อัตราการแบ่งกำลังการคับปลิงแสง ( $\kappa$ ) การเปลี่ยนเฟสแบบเชิงเส้นในโพรงสั่นพ้องวงแหวนขนาดเล็กแบบวงแหวน ดัชนีหักเหแบบ-ไม่เป็นเชิงเส้นและค่าสัญญาณอินพุต ( $P_{in}$ ) ซึ่งใช้ในการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นของโพรงสั่นพ้องวงแหวนขนาดเล็กแบบวงแหวนใยแก้วนำแสงดังจะกล่าวต่อไป

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นของโพรงสั่นพ้องวงแหวนขนาดเล็ก โดยพิจารณาลำแสงอินพุตเป็นสัญญาณของการกระจายแบบ 0

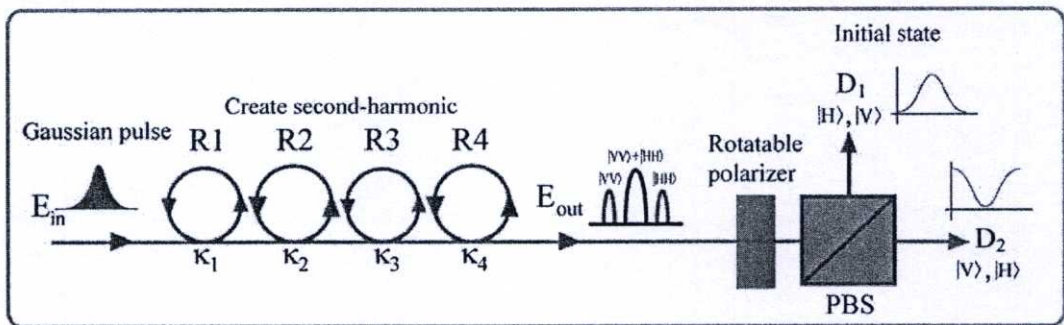
$$P_{in} = P_0 \exp \left[ - \left( \frac{x-y}{z} \right)^2 \right] \quad (3.12)$$

โดยค่าความยาวคลื่น ( $\lambda_0$ ) ในย่านการสื่อสารเท่ากับ  $1.55 \times 10^{-6}$  เมตร ดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้นของ GaInAsP/InP ( $n_2$ ) อยู่ในช่วง  $2.2 - 3.4 \times 10^{-15} m^2/W$  [8] พื้นที่หน้าของแกนนำคลื่นชนิดโหมดเดี่ยว ( $A_{eff}$ ) เท่ากับ  $25 \mu m^2$  อัตราการแบ่งกำลังการคับปลิงแสง ( $\kappa$ ) 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 การศึกษาการเกิด SHG สำหรับการกรองของโพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็กเมื่ออินพุทเป็นพัลส์เกาส์เซียน

วัตถุประสงค์ในการศึกษาขั้นตอนนี้เป็นการจำลองผลของดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้น ( $n_2$ ) ของ GaInAsP/InP แกนท่อนำคลื่น ชนิดโหมดเดี่ยวที่มีค่าอยู่ในช่วง  $2.2 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{W} - 2.2 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{W}$  ที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในโพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็กวงแหวนขนาดเล็กชนิดโหมดเดี่ยว โดยกำหนดให้การเปลี่ยนเฟสแบบเชิงเส้นคงที่ ( $\phi_L = 0$ ) รัศมีของวงแหวน 10 - 30  $\mu\text{m}$  อัตราส่วนการคับปลิงกำลังแสง ( $\kappa$ ) เป็น 0.001 - 0.99 พื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่น ( $A_{\text{eff}}$ ) เป็น  $0.25 - 0.50 \mu\text{m}^2$  สัญญาณเป็นพัลส์เกาส์เซียนโดยให้อินพุทมีกำลัง ( $P_{\text{in}}$ ) เป็น 450 mW และ ความยาวคลื่นกลาง ( $\lambda_0$ ) คือ 1550 nm โดยแผนผังในการทำงานวิจัยสำหรับการสร้าง SHG จากการกรองโดยใช้โพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็ก ดังรูปที่ 3.2



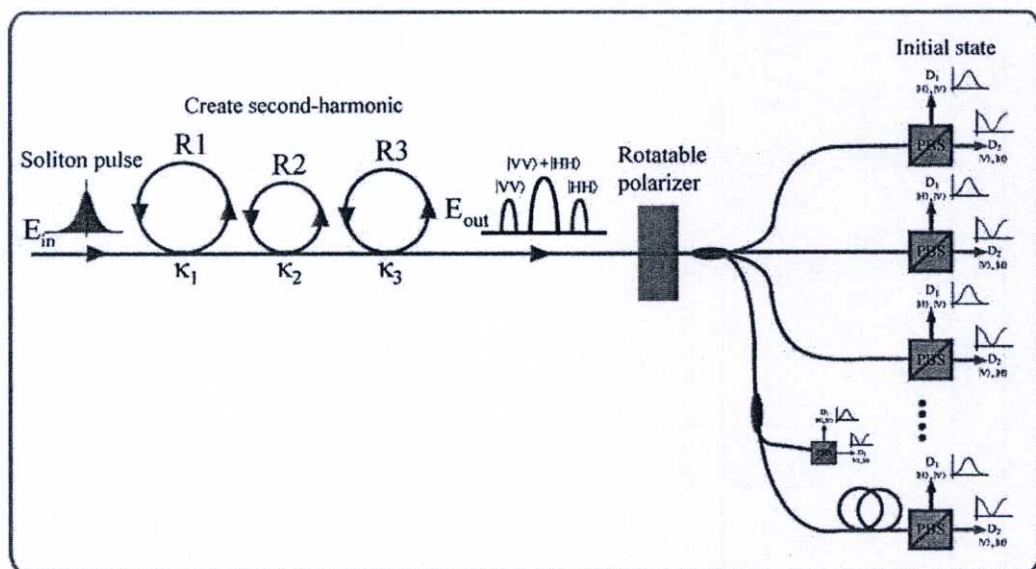
รูปที่ 3.2 แผนผังการสร้าง SHG โดยอาศัยโพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็กวงแหวนขนาดเล็ก

โดยการสร้าง SHG อาศัยความไม่เป็นเชิงเส้นของเนื้อสารที่ใช้ทำท่อนำคลื่นของโพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็ก โดยในวงแหวนแรก R1 และ K1 วงแหวนเริ่มต้นที่สำคัญในการสร้างการเกิดความไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อสัญญาณอินพุทเป็นแบบพัลส์เกาส์เซียน ส่วนของโพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็กวงแหวนที่ R2, R3 และ R4 ทำหน้าที่ในการกรองสัญญาณที่ได้จากวงแหวน R1 ให้เหลือเฉพาะ SHG ที่สะอาดไม่มีการปนของความยาวคลื่นอื่นที่ไม่ต้องการออก โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของวงแหวน และการคับปลิง ที่เหมาะสม โดยสัญญาณที่ได้เป็นการรวมกันของสถานะของโพลาไรซ์ ( H และ V ) อยู่จะต้องทำการวิเคราะห์สัญญาณโดย

อาศัย Rotatable polarizer และ PBS โดยมีขั้นตอน สำหรับสัญญาณที่ได้จากการกรองสัญญาณผ่านเข้าไปใน Rotatable polarizer เป็นตัวควบคุมสถานะโพลาไรซ์ของสัญญาณโดยการหมุนระนาบของการโพลาไรซ์ไปเป็นมุม 180 องศา เมื่อผ่านจาก Rotatable polarizer เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณจะต้องใช้ PBS ในการแยกสถานะของการโพลาไรซ์ออกจากกันเพื่อทำการวัดค่าสำหรับคู่ความสัมพันธ์ของโฟตอน เพื่อเป็นตัววิเคราะห์สถานะทางควอนตัมของสัญญาณที่ได้จากโพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็กวงแหวน

### 3.3 การศึกษาการเกิด SHG สำหรับการกรองของโพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็กเมื่ออินพุตเป็นพัลส์โซลิตอน

วัตถุประสงค์ในการศึกษาขั้นตอนนี้เป็นการจำลองผลของดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้น ( $n_2$ ) ของ GaInAsP/InP แกนท่อนำคลื่น ชนิดโหนดเดี่ยวที่มีค่าอยู่ในช่วง  $2.2 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{W} - 2.2 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{W}$  ที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในโพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็กวงแหวนขนาดเล็กชนิดโหนดเดี่ยว โดยกำหนดให้การเปลี่ยนเฟสแบบเชิงเส้นคงที่ ( $\phi_L = 0$ ) รัศมีของวงแหวน 10 - 30  $\mu\text{m}$  อัตราส่วนการคับปลิงกำลังแสง ( $\kappa$ ) เป็น 0.001 - 0.99 พื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่น ( $A_{\text{eff}}$ ) เป็น  $0.25 - 0.50 \mu\text{m}^2$  สัญญาณเป็นพัลส์โซลิตอนโดยให้อินพุตมีกำลัง ( $P_{\text{in}}$ ) เป็น 450 mW และความยาวคลื่นกลาง ( $\lambda_0$ ) คือ 1550 nm โดยแผนผังในการทำงานวิจัยสำหรับการสร้าง SHG จากการกรองโดยใช้โพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็ก ดังรูปที่ 3.3

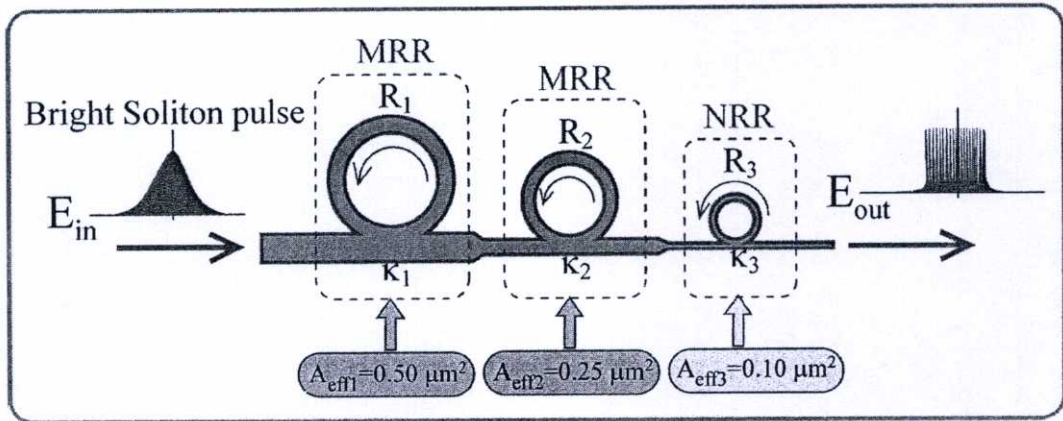


รูปที่ 3.3 แผนผังการสร้างหลายความยาวคลื่น โดยหลักการ SHG จากโพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็กวงแหวนขนาดเล็ก

โดยการสร้าง SHG อาศัยความไม่เป็นเชิงเส้นของเนื้อสารที่ใช้ทำท่อนำคลื่นของโพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็ก และ คุณสมบัติของโซลิตอน โดยในวงแหวนแรก R1 และ K1 วงแหวนเริ่มต้นที่สำคัญในการสร้างการเกิดความไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นแบบพัลส์เกาส์เซียน ส่วนของโพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็กวงแหวนที่ R2 และ R3 ทำหน้าที่ในการกรองสัญญาณที่ได้จากวงแหวน R1 ให้เหลือเฉพาะ SHG ที่สะอาดไม่มีการปนของความยาวคลื่นอื่นที่ต่างกันออก โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของวงแหวน และการคับปลิง ที่เหมาะสม โดยสัญญาณที่ได้เป็นการรวมกันของสถานะของโพลาริซ ( H และ V ) อยู่จะต้องทำการวิเคราะห์สัญญาณโดยอาศัย Rotatable polarizer และ PBS โดยมีขั้นตอน สำหรับสัญญาณที่ได้จากการกรองสัญญาณผ่านเข้าไปใน Rotatable polarizer เป็นตัวควบคุมสถานะโพลาริซของสัญญาณโดยการหมุนระนาบของการโพลาริซไปเป็นมุม 180 องศา เมื่อผ่านจาก Rotatable polarizer เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณจะต้องใช้ PBS ในการแยกสถานะของการโพลาริซออกจากกันเพื่อทำการวัดค่าสำหรับคู่ความสัมพันธ์ของโฟตอน เพื่อเป็นตัววิเคราะห์สถานะทางควอนตัมของสัญญาณที่ได้จากโพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็ก

### 3.4 แบบจำลองการสร้างความยาวคลื่นแบบต่อเนื่องโดยอาศัยโพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็กระดับนาโนเมตรอินพุตเป็นพัลส์โซลิตอน

วัตถุประสงค์ในการศึกษาขั้นตอนนี้เป็นการจำลองผลของดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้น ( $n_2$ ) ของ GaInAsP/InP แกนท่อนำคลื่นชนิดโหมดเดี่ยวที่มีค่าอยู่ในช่วง  $2.2 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{W} - 2.2 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{W}$  ที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในโพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็กวงแหวนขนาดเล็กชนิดโหมดเดี่ยว โดยกำหนดให้การเปลี่ยนเฟสแบบเชิงเส้นคงที่ ( $\phi_L = 0$ ) รัศมีของวงแหวน 10 - 30  $\mu\text{m}$  อัตราส่วนการคับปลิงกำลังแสง ( $\kappa$ ) เป็น 0.001 - 0.99 พื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่น ( $A_{\text{eff}}$ ) เป็น  $0.25 - 0.50 \mu\text{m}^2$  สัญญาณเป็นพัลส์โซลิตอนโดยให้อินพุตมีกำลัง (Pin) เป็น 650 mW และ ความยาวคลื่นกลาง ( $\lambda_0$ ) คือ 1550 nm โดยแผนผังในการทำงานวิจัยสำหรับการสร้าง SHG จากการกรองโดยใช้โพรงสั้นพ้องวงแหวนขนาดเล็กวงแหวนขนาดเล็กดังรูปที่ 3.4 จากรูปแสดงการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่นเพื่อไปเป็นระดับนาโนเมตร สำหรับพื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่นของระดับนาโนเมตรเป็น  $0.10 \mu\text{m}^2$  [28] เพื่อเป็นการเพิ่มความเข้มสัญญาณของระบบ เห็นได้ว่าไม่สามารถที่จะให้พัลส์ที่มีขนาดใหญ่กับระบบขนาดเล็กได้ในแนวทางการแก้ปัญหาจึงให้กับระบบของท่อนำคลื่นขนาดใหญ่แล้วลดลงมาตามลำดับเพื่อใส่พัลส์เข้าไปในระบบที่เป็นนาโนเมตร



รูปที่ 3.4 แผนผังการสร้างแถบความคลื่นแบบต่อเนื่องโดยอาศัยโพรงสั่นพ้องวงแหวนขนาดเล็กแบบนาโนเมตร

การสร้างแถบความยาวคลื่นแบบต่อเนื่องอาศัยความไม่เป็นเชิงเส้นของเนื้อสารที่ใช้ทำท่อนำคลื่นของโพรงสั่นพ้องวงแหวนขนาดเล็ก และ คุณสมบัติของโซลิตอน โดยในวงแหวนแรก R1 และ K1 วงแหวนเริ่มต้นที่สำคัญในการสร้างการเกิดความไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นแบบโซลิตอนที่มีสมบัติเป็นการรวมเฟสกันของพัลส์สัญญาณ ส่วนของโพรงสั่นพ้องวงแหวนขนาดเล็กวงแหวนที่ R<sub>2</sub> , และ R<sub>3</sub> ทำหน้าที่ในการกรองสัญญาณที่ได้จากวงแหวน R1 ให้เหลือเฉพาะแถบความยาวคลื่นที่ต้องการที่สะอาดไม่มีการปนของความยาวคลื่นอื่นที่ไม่ต่างการออก โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของวงแหวน และ การคับปลิง ที่เหมาะสม อีกอย่างหนึ่งที่เป็นความสำคัญในการสร้างแถบความยาวคลื่นแบบต่อเนื่องคือ การเปลี่ยนค่าของพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่น จาก  $A_{eff1} = 0.50 \mu\text{m}^2$  ,  $A_{eff2} = 0.25 \mu\text{m}^2$  และ  $A_{eff3} = 0.10 \mu\text{m}^2$  ตามลำดับ โดยสิ่งที่เป็นตัวกำหนดวงแหวนระดับนาโนเมตรคือค่าของพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่น

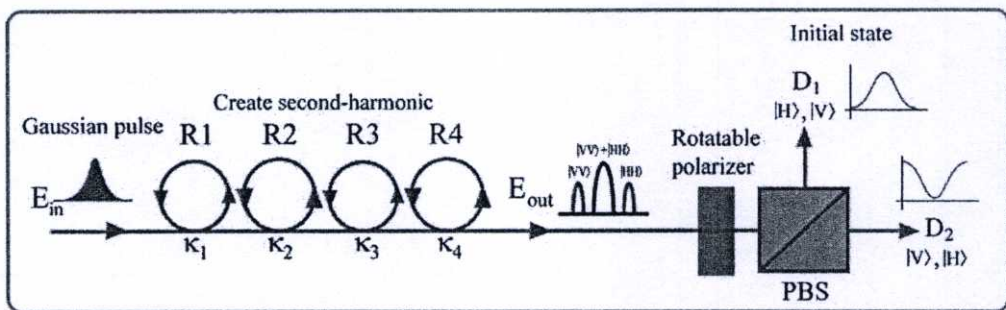
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

การทดลองผลจากการอินพุตสำหรับพัลส์เกาส์เซียน ( Gaussian Pulse ) สำหรับการกรองของโพรงสั้น พ้องวงแหวนขนาดเล็กทำจากวัสดุที่ไม่เป็นเชิงเส้น (GaInAsP/InP) ในการสร้างสัญญาณ SHG ทำการเปลี่ยนแปลงอินพุตเป็นพัลส์โซลิตอน ( Soliton pulse ) แทนสัญญาณเกาส์เซียนในข้างต้น และ สุดท้ายเป็นการสร้างสัญญาณแถบความยาวคลื่นแบบต่อเนื่องโดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่นแสง

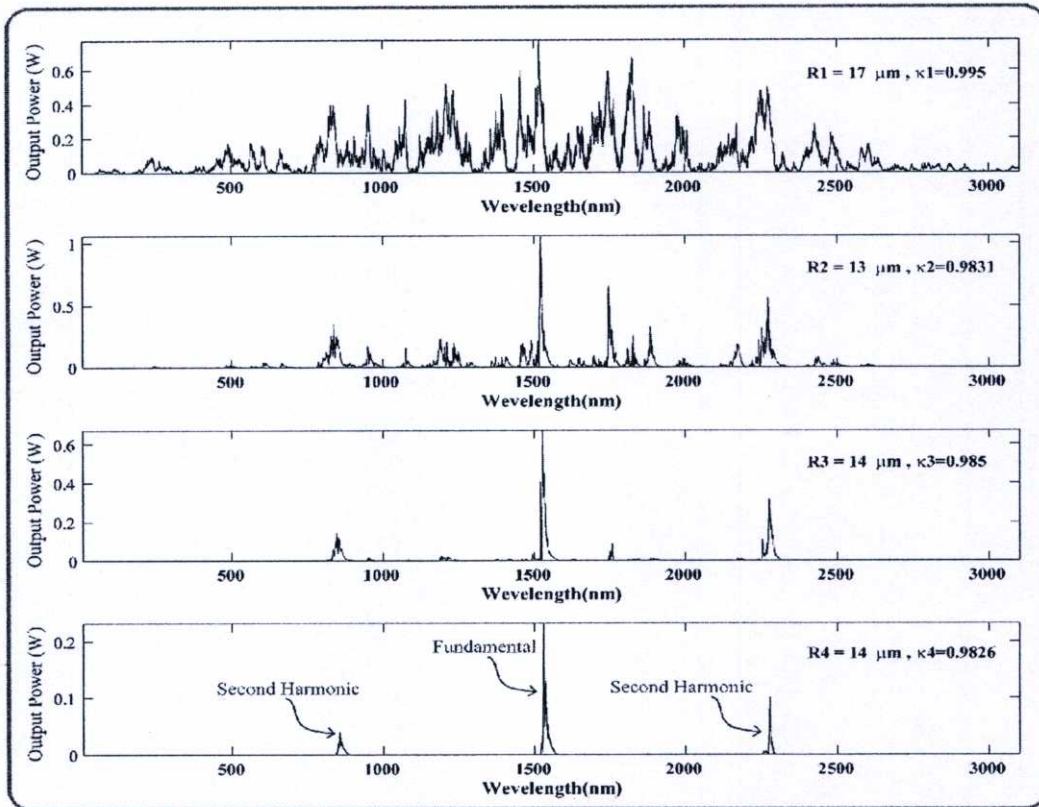
#### 4.1 การสร้าง SHG โดยใช้สัญญาณอินพุตเป็นเกาส์เซียน

การจำลองผลของดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้นของ GaInAsP/InP ( $n_2$ ) ของแกนท่อนำคลื่นแสงชนิด โหมดเดี่ยวมีค่าอยู่ที่  $2.2 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{W}$  ที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในโพรงสั้นพ้องแบบ วงแหวนขนาดเล็กชนิดโหมดเดี่ยว โดยกำหนดให้การเปลี่ยนเฟสแบบเชิงเส้นคงที่ ( $\phi_L = 0$ ) รัศมีของวงแหวน 10 - 30  $\mu\text{m}$  อัตราส่วนการคัปปลิงกำลังแสง ( $\kappa$ ) เป็น 0.97 - 0.99 พื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่นแสง ( $A_{\text{eff}}$ ) เป็น  $0.50 \mu\text{m}^2$  สัญญาณเป็นพัลส์เกาส์เซียนโดยให้อินพุตมีกำลัง (Pin) เป็น 450 mW และ ความยาวคลื่นกลาง ( $\lambda_0$ ) คือ 1550 นาโนเมตร โดยแผนผังในการทำงานวิจัยสำหรับการสร้าง SHG จากการกรองโดยใช้โพรงสั้นพ้อง แบบวงแหวนขนาดเล็ก [ 29 , 30 ] ดังรูปที่ 4.1



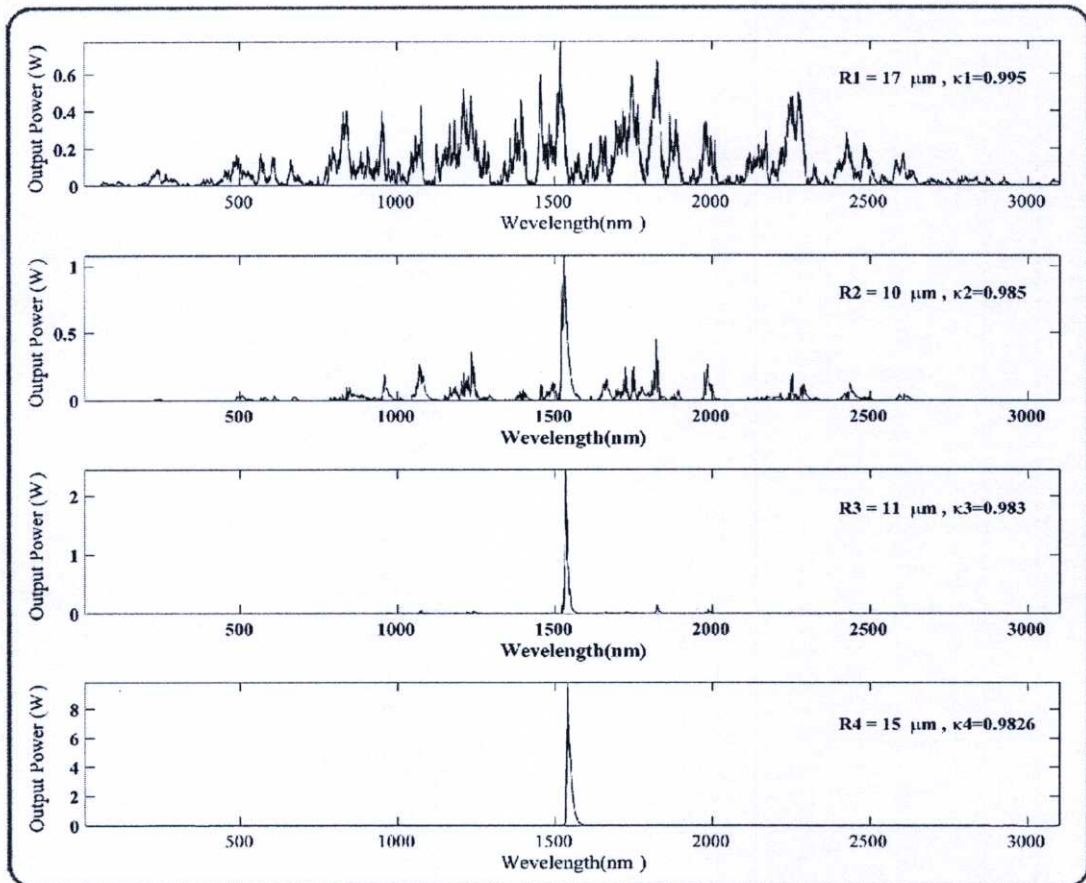
รูปที่ 4.1 แบบจำลองการกรองของโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กเมื่ออินพุตเป็นเกาส์เซียน

โดยแบบจำลองเป็นการนำโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กต่อแบบอนุกรมเพื่อสร้างสัญญาณ SHG เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่า รัศมีของวงแหวน และ ค่าคัปปลิงของสัญญาณ เพื่อทำการสร้างแถบพลาตอดสัญญาณค่าอื่นที่ไม่ต้องการ และ ทำการวิเคราะห์สถานะควอนตัมของโฟตอน โดย Rotatable polarizer และ PBS



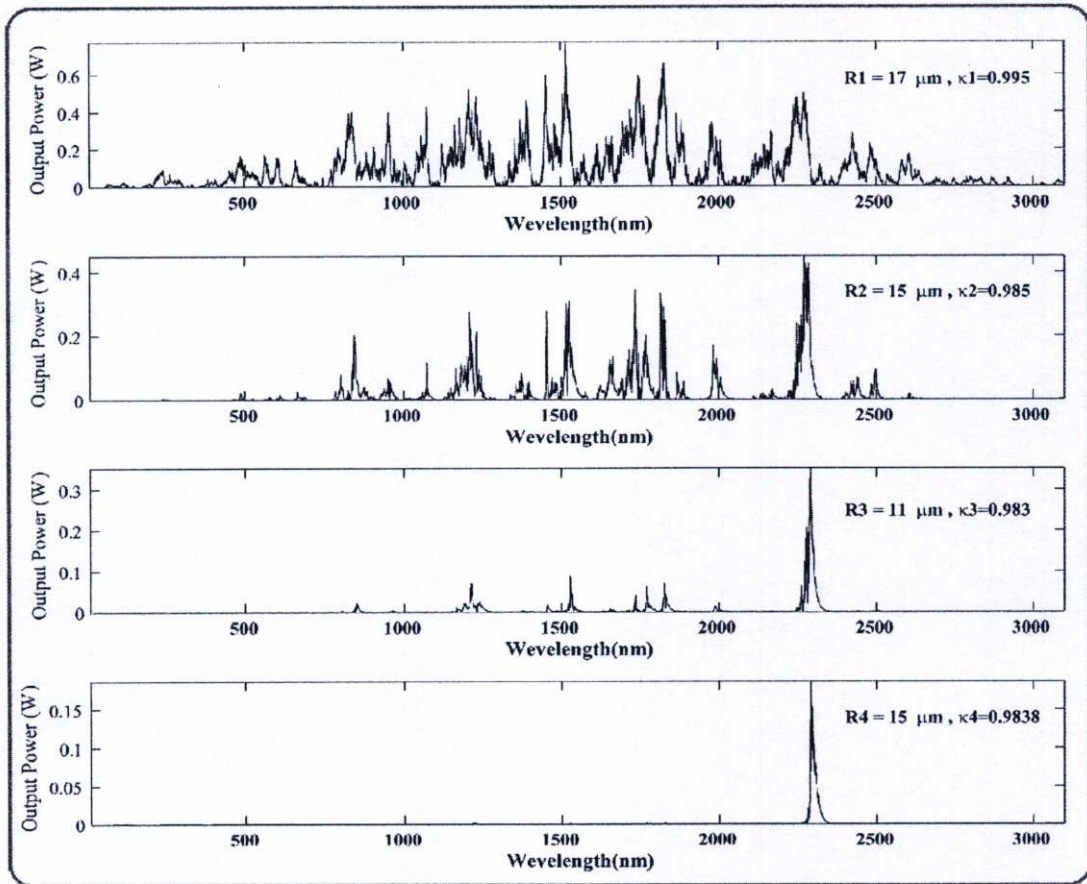
รูปที่ 4.2 แสดงสัญญาณเคออสเมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกัน มีรัศมี  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  และ  $R_4$  คือ 17, 13, 14 และ 14 ไมครอน ค่าคัปปลิง  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$ ,  $\kappa_4$  เป็น 0.995, 0.9831, 0.985 และ 0.9826

การสร้างแบบจำลองนี้ใช้สัญญาณของแก๊สเซียนโดยให้อินพุตมีกำลัง 450 mW พื้นที่หน้าตัดของแกนนำคลื่นแสง ( $A_{eff}$ )  $0.50 \mu\text{m}^2$  และความยาวคลื่นกลาง ( $\lambda_0$ ) คือ 1550 นาโนเมตร เมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  และ  $R_4$  คือ 17, 13, 14 และ 14 ไมครอน ค่าคัปปลิง  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$ ,  $\kappa_4$  เป็น 0.995, 0.9831, 0.985 และ 0.9826 เมื่อสัญญาณเริ่มต้นเป็น 1550 นาโนเมตร เมื่อผ่านการกรองโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรม โดยวงที่หนึ่งเป็นตัวกระจายสัญญาณความถี่ออกเป็นหลายแถบสัญญาณเอาท์พุทจากวงที่หนึ่งจะถูกกรองสัญญาณด้วยวงที่ 2, 3 และ 4 ตามลำดับ สัญญาณที่ได้จากการกรองจะเหลือช่วงความยาวคลื่นเป็น 3 ช่วงคือ ช่วงที่หนึ่งความถี่ต่ำ ( $\omega/2$ ) หรือความยาวคลื่นยาวขึ้นคือช่วง 2325 นาโนเมตร ช่วงที่สองความถี่เดิม หรือความยาวคลื่นเดิมของสัญญาณคือช่วง 1550 นาโนเมตร และ ช่วงที่สามความถี่สูง ( $2\omega$ ) หรือ ความยาวคลื่นสั้นลงคือช่วง 775 นาโนเมตร ตามลำดับ



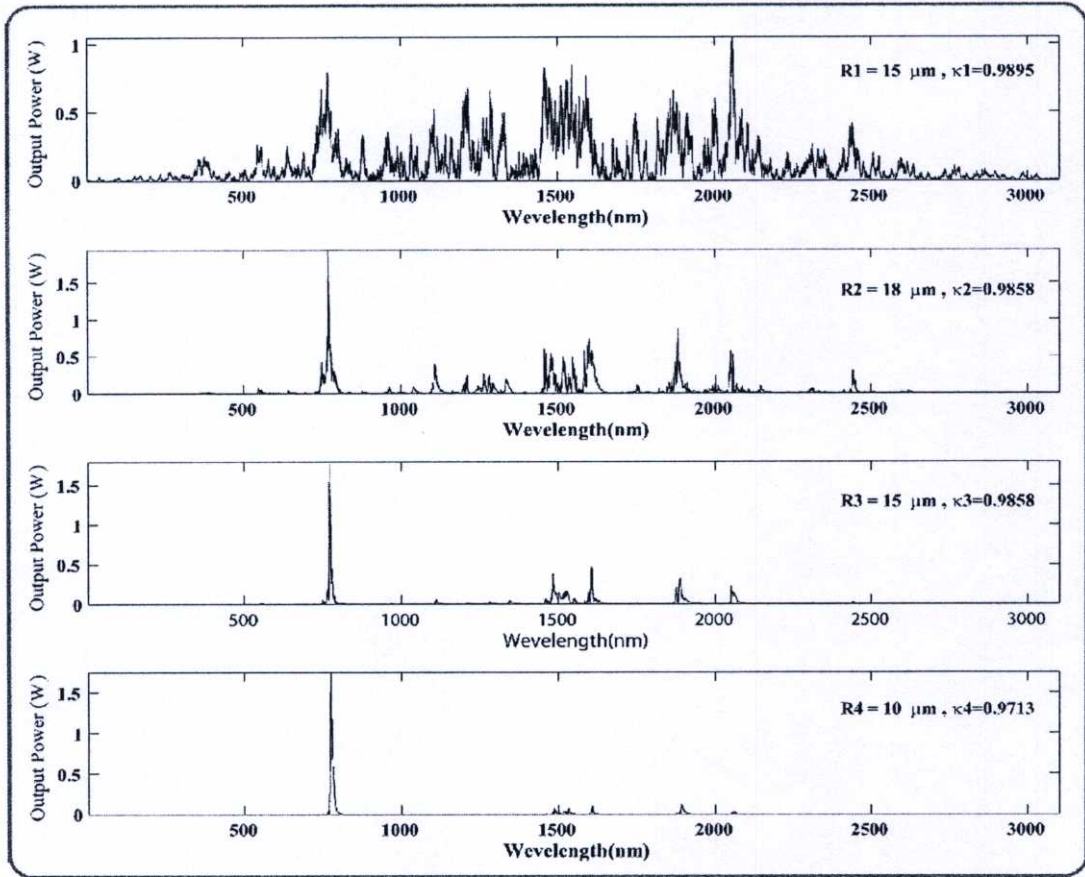
รูปที่ 4.3 แสดงสัญญาณเคออสเมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกัน มีรัศมี  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  และ  $R_4$  คือ 17, 10, 11 และ 15 ไมครอน ค่าคัปปลิง  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$ ,  $\kappa_4$  เป็น 0.995, 0.985, 0.983 และ 0.9826

การสร้างแบบจำลองนี้ใช้สัญญาณของแก๊สเซียนโดยให้อินพุทมีกำลัง 450 mW พื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่นแสง ( $A_{eff}$ )  $0.50 \mu\text{m}^2$  และ ความยาวคลื่นกลาง ( $\lambda_0$ ) คือ 1550 นาโนเมตร เมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  และ  $R_4$  คือ 17, 10, 11 และ 15 ไมครอน ค่าคัปปลิง  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$ ,  $\kappa_4$  เป็น 0.995, 0.985, 0.983 และ 0.9826 เมื่อสัญญาณเริ่มต้นเป็น 1550 นาโนเมตร เมื่อผ่านการกรองโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรม โดยวงที่หนึ่งเป็นตัวกระจายสัญญาณความถี่ออกเป็นหลายแถบสัญญาณ เอาท์พุทจากวงที่หนึ่งจะถูกกรองสัญญาณด้วยวงที่ 2, 3 และ 4 ตามลำดับสัญญาณที่ได้จากการกรองจะเหลือช่วงความถี่เดิม หรือความยาวคลื่นเดิมของสัญญาณคือช่วง 1550 นาโนเมตร



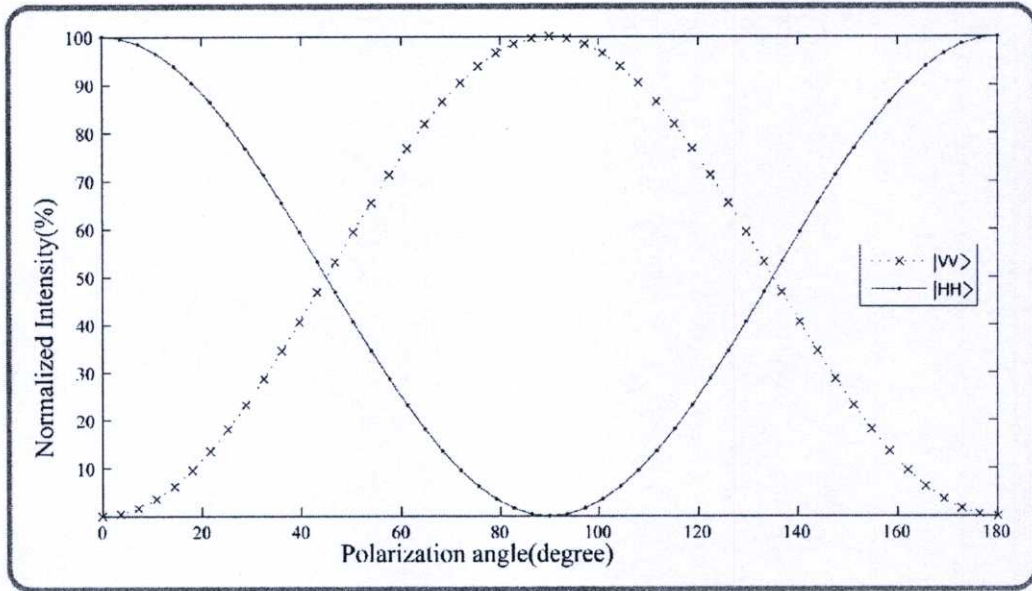
รูปที่ 4.4 แสดงสัญญาณเคออสเมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกัน มีรัศมี  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  และ  $R_4$  คือ 17, 15, 11 และ 15 ไมครอน ค่าคัปปลิง  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$ ,  $\kappa_4$  เป็น 0.995, 0.985, 0.983 และ 0.9838

การสร้างแบบจำลองนี้ใช้สัญญาณของเกาส์เขียนกำลัง 450 mW พื้นที่หน้าตัดของแกนนำคลื่นแสง ( $A_{eff}$ )  $0.50 \mu\text{m}^2$  และความยาวคลื่นกลาง ( $\lambda_0$ ) คือ 1550 นาโนเมตร เมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  และ  $R_4$  คือ 17, 15, 11 และ 15 ไมครอน ค่าคัปปลิง  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$ ,  $\kappa_4$  เป็น 0.995, 0.985, 0.983 และ 0.9838 เมื่อสัญญาณเริ่มต้นเป็น 1550 นาโนเมตร เมื่อผ่านการกรองโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรม โดยวงที่หนึ่งเป็นตัวกระจายสัญญาณความถี่ออกเป็นหลายแถบสัญญาณ เอ้าท์พุทจากวงที่หนึ่งจะถูกกรองสัญญาณด้วยวงที่ 2, 3 และ 4 ตามลำดับ สัญญาณที่ได้จากการกรองจะเหลือช่วงความถี่ต่ำ ( $\omega/2$ ) หรือความยาวคลื่นยาวขึ้นคือช่วง 2325 นาโนเมตร



รูปที่ 4.5 แสดงสัญญาณเคออสเมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกัน มีรัศมี  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  และ  $R_4$  คือ 15, 18, 15 และ 10 ไมครอน ค่าคัปปลิง  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$ ,  $\kappa_4$  เป็น 0.9895, 0.9858, 0.9858 และ 0.9713

การสร้างแบบจำลองนี้ใช้สัญญาณของแก๊สเขียนกำลัง 450 mW พื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่นแสง ( $A_{eff}$ )  $0.50 \mu\text{m}^2$  และ ความยาวคลื่นกลาง ( $\lambda_0$ ) คือ 1550 นาโนเมตร เมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  และ  $R_4$  คือ 15, 18, 15 และ 10 ไมครอน ค่าคัปปลิง  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$ ,  $\kappa_4$  เป็น 0.9895, 0.9858, 0.9858 และ 0.9713 เมื่อสัญญาณเริ่มต้นเป็น 1550 นาโนเมตร เมื่อผ่านการกรองโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรม โดยวงที่หนึ่งเป็นตัวกระจายสัญญาณความถี่ออกเป็นหลายแถบสัญญาณ เอาท์พุทจากวงที่หนึ่งจะถูกกรองสัญญาณด้วยวงที่ 2, 3 และ 4 ตามลำดับ สัญญาณที่ได้จากการกรองจะเหลือช่วงความถี่สูง ( $2\omega$ ) หรือ ความยาวคลื่นสั้นลงคือช่วง 775 นาโนเมตร



รูปที่ 4.6 แสดงสัญญาณของ H และ V เมื่อ ทำการหมุน Rotatable Polarizer จาก 0 – 180 องศา

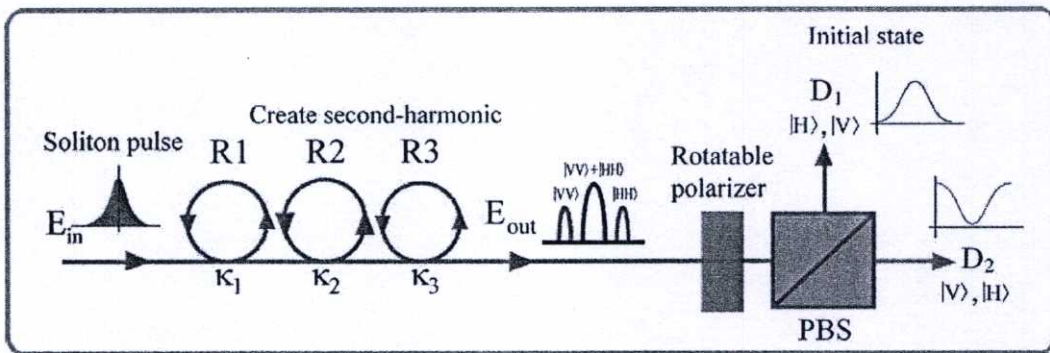
กราฟที่ได้เป็นกราฟแสดงความเข้มของสัญญาณเมื่อนำสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ทำการกรองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ โจนส์เมทริกซ์ ( Jones matrix ) ในการวิเคราะห์สัญญาณเมื่อ

$$M(\theta) = R(\theta)MR(-\theta) \quad (4.1)$$

เมื่อ ทำการเปลี่ยนมุมของการหมุนสำหรับ Rotatable Polarizer ที่เป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ จาก 0 – 180 องศา สัญญาณส่งผ่านไปที่ PBS เพื่อแยกสถานะของโฟตอนสำหรับ H และ V ทำการวัดสัญญาณที่เกิดจากการเปลี่ยนมุมของ Rotatable Polarizer นำสัญญาณที่ได้แสดงค่าตามมุมโดยความเข้มสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบ Normalized จากแบบจำลองจะได้ว่าค่าของ H และ V จะมีความสัมพันธ์กันสำหรับความเข้มของสัญญาณ โดยมีการเพิ่มหรือลดสัญญาณเป็นไปในทิศทางตรงกันข้ามแต่มื่อนำค่าทั้งสองมารวมกันจะค่าคงเดิม จากกราฟได้ว่า H และ V มีค่าเท่ากันมีสองมุมคือมุม 45° และ 135° ส่วนตำแหน่งที่ H = 1 และ V = 0 มีอยู่สามตำแหน่งคือ 0°, 90° และ 180° จากกราฟความสัมพันธ์ของ H และ V ไม่ว่าจะเป็นที่ตำแหน่งใดก็จะมีค่าผลรวมเป็น 1 เท่ากันในทุกตำแหน่ง ซึ่งเป็นในแนวทางเดียวกันกับงานวิจัยของ สืบตระกูล สุชาติ [8] ที่เป็นการทดลอง

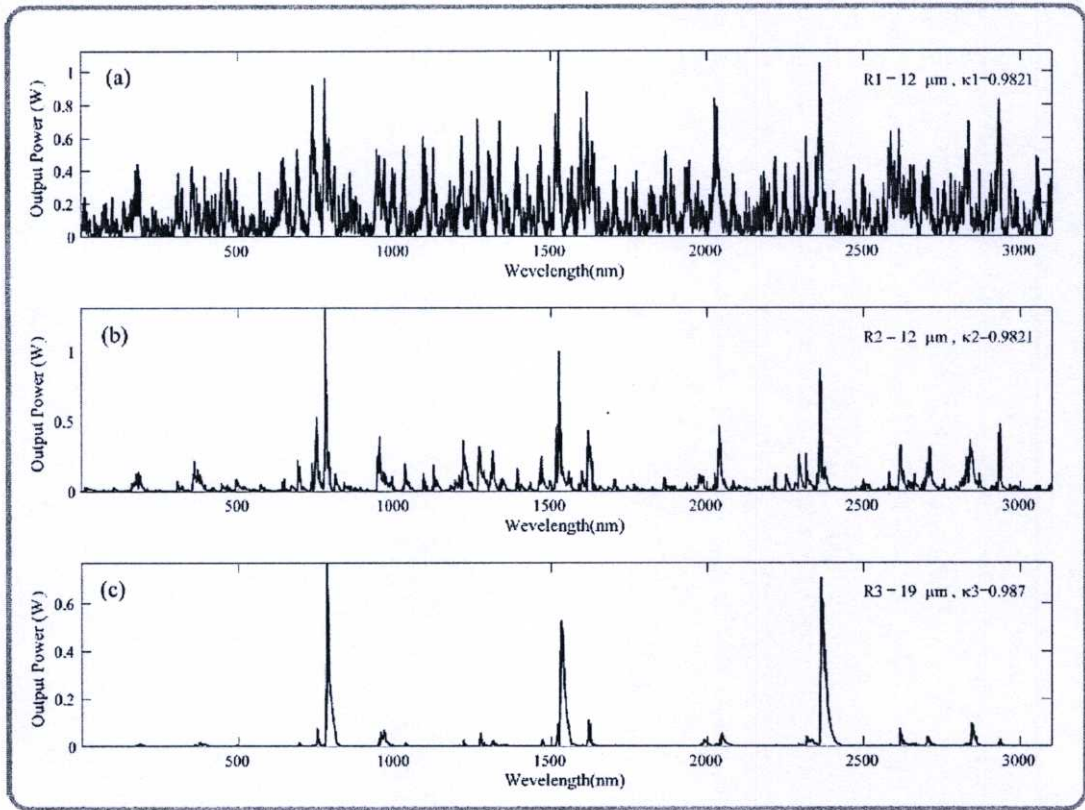
#### 4.2 การสร้าง SHG โดยใช้สัญญาณอินพุทเป็นพัลส์โซลิตอน

การจำลองผลของดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้น GaInAsP/InP ( $n_2$ ) ของแกนท่อนำคลื่นแสงชนิดโหมคเดี่ยวมีค่าอยู่ที่  $2.2 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{W}$  ที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กชนิดโหมคเดี่ยว โดยกำหนดให้การเปลี่ยนเฟสแบบเชิงเส้นคงที่ ( $\phi_L = 0$ ) รัศมีของวงแหวน 10 - 30  $\mu\text{m}$  อัตราส่วนการคัปปลิงกำลังแสง ( $\kappa$ ) เป็น 0.001 - 0.99 พื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่นแสง ( $A_{\text{eff}}$ ) เป็น  $0.50 \mu\text{m}^2$  สัญญาณเป็นพัลส์โซลิตอนโดยให้อินพุทมีกำลัง ( $P_{\text{in}}$ ) เป็น 450 mW และ ความยาวคลื่นกลาง ( $\lambda_0$ ) คือ 1550 นาโนเมตร โดยแผนผังในการทำงานวิจัยสำหรับการสร้าง SHG จากการกรองโดยใช้โพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก [31] ดังรูปที่ 4.7



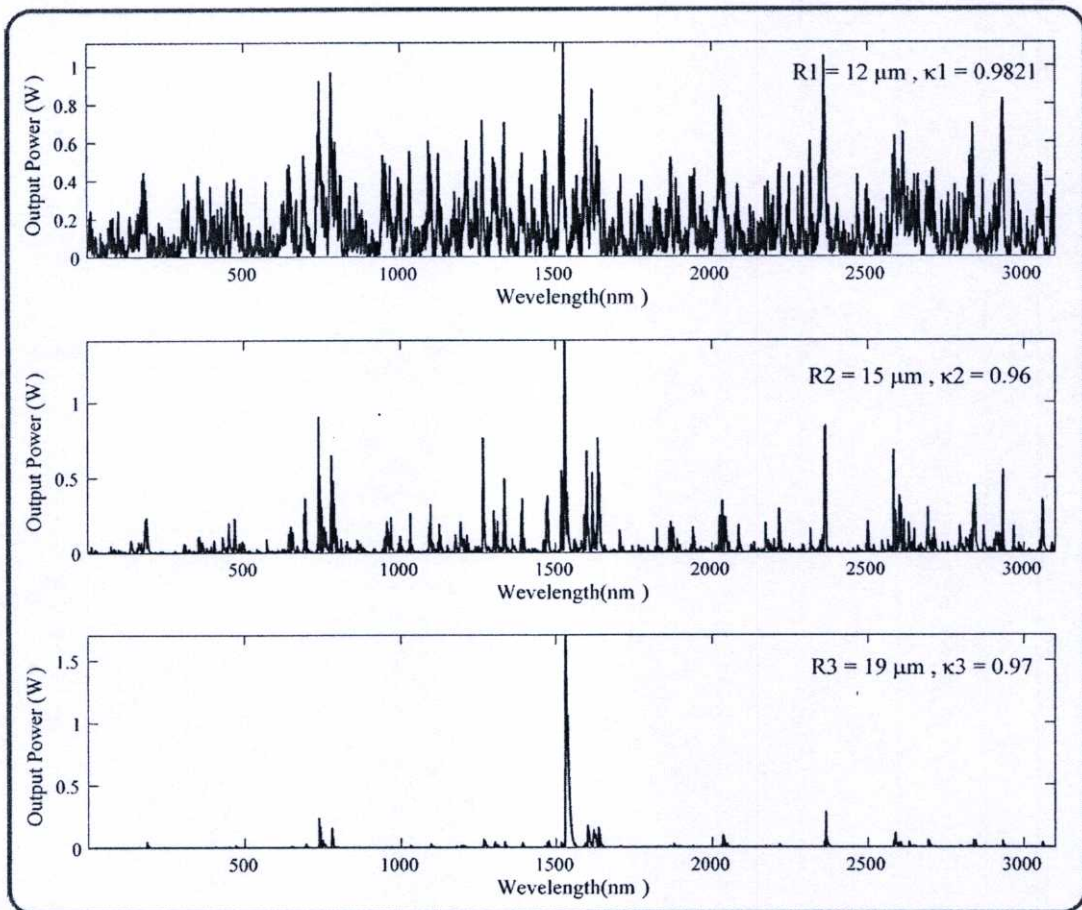
รูปที่ 4.7 แบบจำลองการกรองของโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กเมื่ออินพุทเป็นแก๊สเซียน

โดยแบบจำลองเป็นการนำโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กต่อแบบอนุกรมเพื่อสร้างสัญญาณ SHG เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่า รัศมีของวงแหวน และ ค่าคัปปลิงของสัญญาณ เมื่อ ดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้น ( $n_2$ ) ของแกนท่อนำคลื่นแสงชนิดโหมคเดี่ยวมีค่าอยู่ที่  $2.2 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{W}$  พื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่นแสง ( $A_{\text{eff}}$ ) เป็น  $0.50 \mu\text{m}^2$  สัญญาณเป็นพัลส์โซลิตอนโดยให้อินพุทมีกำลัง ( $P_{\text{in}}$ ) เป็น 450 mW และ ความยาวคลื่นกลาง ( $\lambda_0$ ) คือ 1550 นาโนเมตร เป็นค่าคงที่ไม่มีเปลี่ยนแปลง สำหรับขั้นตอนของงานวิจัยนี้สัญญาณที่ใช้เป็นอินพุทคือพัลส์โซลิตอนเพื่อขยายแถบความยาวคลื่นให้กว้างขึ้นโดยอาศัยคุณสมบัติของโซลิตอน ที่เป็น self-phase modulation และ cross-phase modulation จากคุณสมบัติของโซลิตอนจะทำให้เกิดการหนูนแบบต่อเนื่องของพัลส์สัญญาณ สำหรับโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กโดยมีวงที่หนึ่งเป็นตัวสร้างแถบความยาวคลื่นให้กว้างขึ้นนำวงที่สองและสามต่อแบบอนุกรมเพื่อเป็นตัวกรองสัญญาณความถี่ที่ไม่ต้องการออกให้เป็น SHG ที่ต้องการ สำหรับสัญญาณที่ได้สำหรับอินพุทโซลิตอนจะไม่ได้ทำการวิเคราะห์สถานะทางควอนตัมเนื่องจากผลได้ถูกยืนยันโดยผลการสร้างแบบจำลองในตอนหนึ่งแล้ว



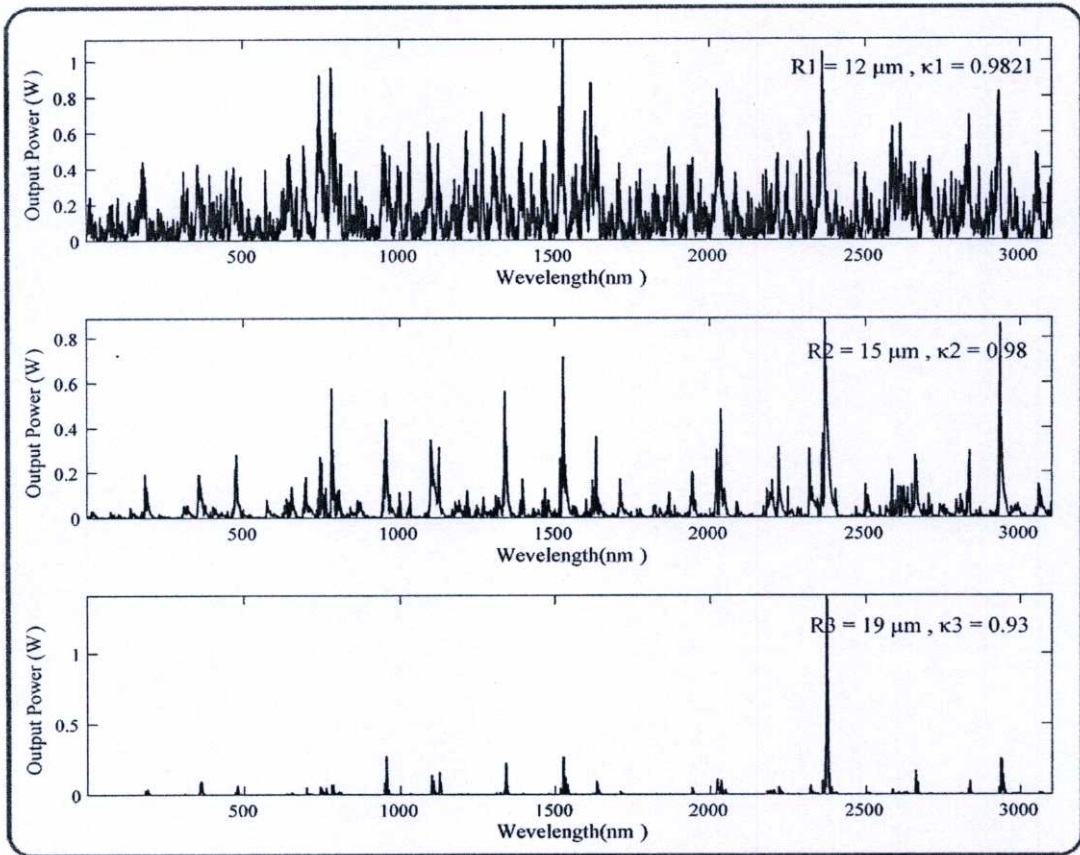
รูปที่ 4.8 แสดงสัญญาณเคออสเมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกัน มีรัศมี  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_3$  คือ 12, 12 และ 19 ไมครอน ค่าคัปปลิง  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$  เป็น 0.9821, 0.9821 และ 0.987

การสร้างแบบจำลองนี้ใช้สัญญาณของพัลส์โซลิตอนโดยให้อินพุตมีกำลัง 450 mW พื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่นแสง ( $A_{eff}$ )  $0.50 \mu m^2$  และ ความยาวคลื่นกลาง ( $\lambda_0$ ) คือ 1550 นาโนเมตร เมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_3$  คือ 12, 12 และ 19 ไมครอน ค่าคัปปลิง  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$  เป็น 0.9821, 0.9821 และ 0.987 เมื่อสัญญาณเริ่มต้นเป็น 1550 นาโนเมตร เมื่อผ่านการกรองโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรม โดยวงที่หนึ่งเป็นตัวกระจายสัญญาณความถี่ออกเป็นหลายแถบสัญญาณ เอาท์พุทจากวงที่หนึ่งจะถูกกรองสัญญาณด้วยวงที่ 2, 3 และ 4 ตามลำดับ สัญญาณที่ได้จากการกรองจะเหลือช่วงความยาวคลื่นเป็น 3 ช่วงคือ ช่วงที่หนึ่งความถี่ต่ำ ( $\omega/2$ ) หรือความยาวคลื่นยาวขึ้นคือช่วง 2325 นาโนเมตร ช่วงที่สองความถี่เดิม หรือความยาวคลื่นเดิมของสัญญาณคือช่วง 1550 นาโนเมตร และ ช่วงที่สามความถี่สูง ( $2\omega$ ) หรือ ความยาวคลื่นสั้นลงคือช่วง 775 นาโนเมตร ตามลำดับ จากกราฟแสดงให้เห็นยอดของสัญญาณทั้งสามยอดที่ได้จากโซลิตอนเท่ากันแตกต่างจากสัญญาณที่ได้จากเกาส์เซียนซึ่งเป็นผลจากคุณสมบัติของพัลส์โซลิตอน



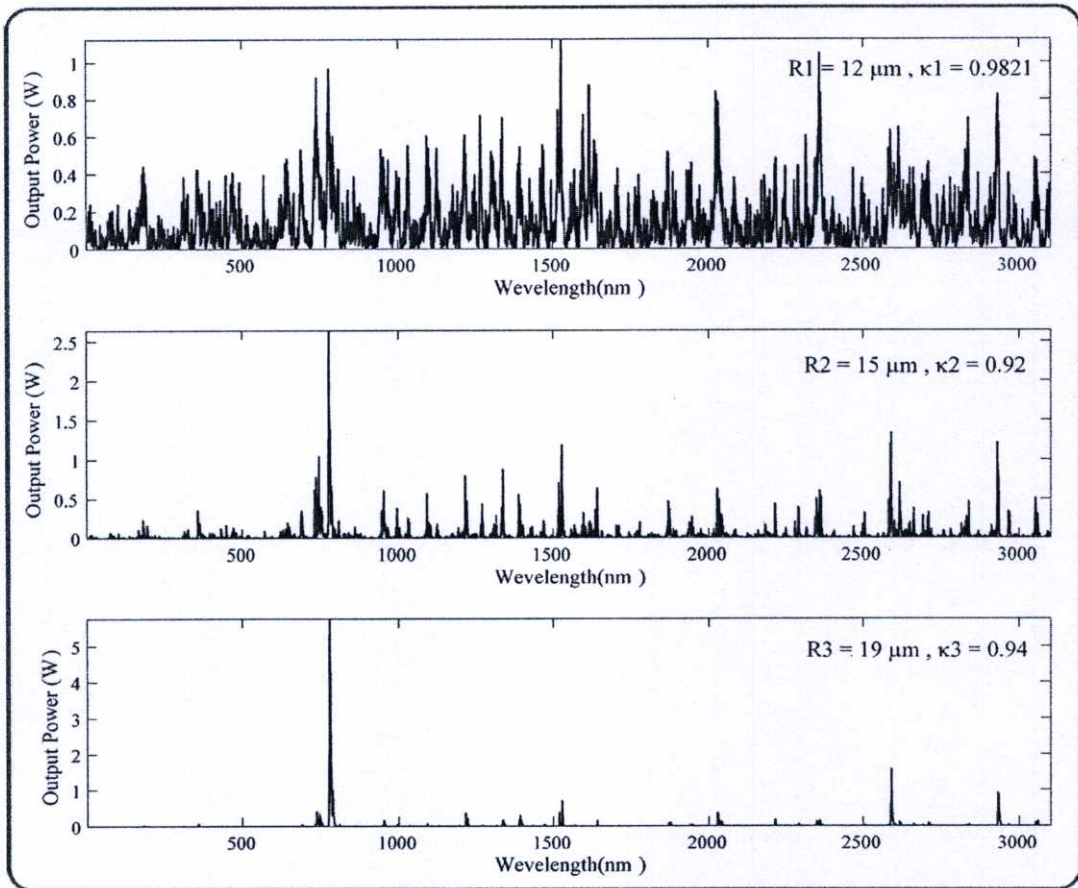
รูปที่ 4.9 แสดงสัญญาณเคออสเมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกัน มีรัศมี  $R_1, R_2$  และ  $R_3$  คือ 12, 15 และ 19 ไมครอน ค่าคัปปลิง  $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$  เป็น 0.9821, 0.96 และ 0.97

การสร้างแบบจำลองนี้ใช้สัญญาณของพัลส์โซลิตอนโดยให้อินพุตมีกำลัง 450 mW พื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่นแสง ( $A_{eff}$ )  $0.50 \mu\text{m}^2$  และ ความยาวคลื่นกลาง ( $\lambda_0$ ) คือ 1550 นาโนเมตร เมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี  $R_1, R_2$  และ  $R_3$  คือ 12, 15 และ 19 ไมครอน ค่าคัปปลิง  $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$  เป็น 0.9821, 0.96 และ 0.97 เมื่อสัญญาณเริ่มต้นเป็น 1550 นาโนเมตร เมื่อผ่านการกรองโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรม โดยวงที่หนึ่งเป็นตัวกระจายสัญญาณความถี่ออกเป็นหลายแถบสัญญาณ เอาท์พุทจากวงที่หนึ่งจะถูกกรองสัญญาณด้วยวงที่ 2 และ 3 ตามลำดับ สัญญาณที่ได้จากการกรองจะเหลือช่วงความถี่เดิม หรือความยาวคลื่นเดิมของสัญญาณคือช่วง 1550 นาโนเมตร จากกราฟแสดงให้เห็นแถบสัญญาณที่ได้จากโซลิตอนจะแคบกว่าหรือคมกว่า และ สัญญาณยังมีความเข้มสูงกว่า สัญญาณที่ได้จากเกาส์เซียนซึ่งเป็นผลจากคุณสมบัติของพัลส์โซลิตอน



รูปที่ 4.10 แสดงสัญญาณแคออสเมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกัน มีรัศมี  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_3$  คือ 12, 15 และ 19 ไมครอน ค่าคัปปลิง  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$  เป็น 0.9821, 0.98 และ 0.93

การสร้างแบบจำลองนี้ใช้สัญญาณของพัลส์โซลิตอนโดยให้อินพุตมีกำลัง 450 mW พื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่นแสง ( $A_{eff}$ )  $0.50 \mu m^2$  และ ความยาวคลื่นกลาง ( $\lambda_0$ )คือ 1550 นาโนเมตร เมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_3$  คือ 12, 12 และ 19 ไมครอน ค่าคัปปลิง  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$  เป็น 0.9821, 0.98 และ 0.93 เมื่อสัญญาณเริ่มต้นเป็น 1550 นาโนเมตร เมื่อผ่านการกรองโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรม โดยวงที่หนึ่งเป็นตัวกระจายสัญญาณความถี่ออกเป็นหลายแถบสัญญาณจากสัญญาณเอาต์พุตจากวงที่หนึ่งจะถูกกรองสัญญาณด้วยวงที่ 2 และ 3 ตามลำดับ สัญญาณที่ได้จากการกรองจะเหลือช่วงความถี่ต่ำ ( $\omega/2$ ) หรือความยาวคลื่นยาวขึ้นคือช่วง 2325 นาโนเมตร จากกราฟแสดงให้เห็นแถบสัญญาณที่ได้จากโซลิตอนจะแคบกว่าหรือคมกว่า และ สัญญาณยังมีความเข้มสูงกว่า สัญญาณที่ได้จากเกาส์เซียนซึ่งเป็นผลจากคุณสมบัติของพัลส์โซลิตอน

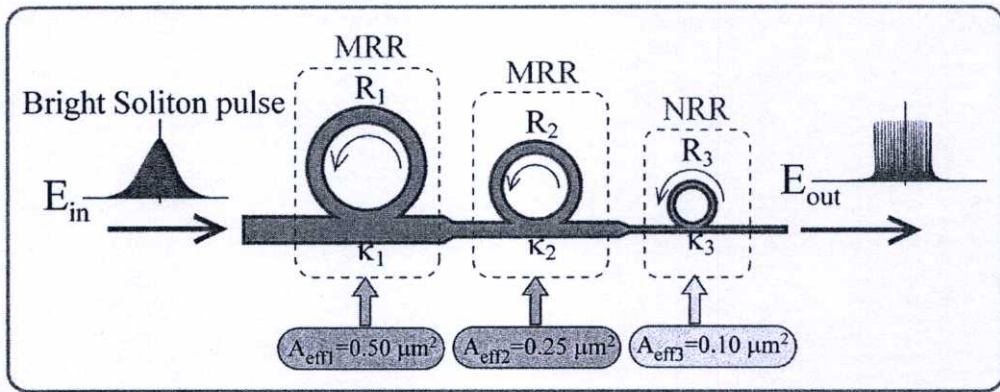


รูปที่ 4.11 แสดงสัญญาณเคออสเมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกัน มีรัศมี  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_3$  คือ 12, 15 และ 19 ไมครอน ค่าคัปปลิง  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$  เป็น 0.9821, 0.92 และ 0.94

การสร้างแบบจำลองนี้ใช้สัญญาณของพัลส์โซลิตอนโดยให้อินพุตมีกำลัง 450 mW พื้นที่หน้าตัดของแกนนำคลื่นแสง ( $A_{eff}$ )  $0.50 \mu m^2$  และ ความยาวคลื่นกลาง ( $\lambda_0$ ) คือ 1550 นาโนเมตร เมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_3$  คือ 12, 12 และ 19 ไมครอน ค่าคัปปลิง  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$  เป็น 0.9821, 0.92 และ 0.94 เมื่อสัญญาณเริ่มต้นเป็น 1550 นาโนเมตร เมื่อผ่านการกรองโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรม โดยวงที่หนึ่งเป็นตัวกระจายสัญญาณความถี่ออกเป็นหลายแถบสัญญาณจากสัญญาณเอาต์พุตจากวงที่หนึ่งจะถูกกรองสัญญาณด้วยวงที่ 2 และ 3 ตามลำดับ สัญญาณที่ได้จากการกรองจะเหลือช่วงความถี่สูง ( $2\omega$ ) หรือ ความยาวคลื่นสั้นลงคือช่วง 775 นาโนเมตร จากกราฟแสดงให้เห็นแถบสัญญาณที่ได้จากโซลิตอนจะแคบกว่าหรือคมกว่า และ สัญญาณยังมีความเข้มสูงกว่า สัญญาณที่ได้จากเกาส์เซียนซึ่งเป็นผลจากคุณสมบัติของพัลส์โซลิตอน

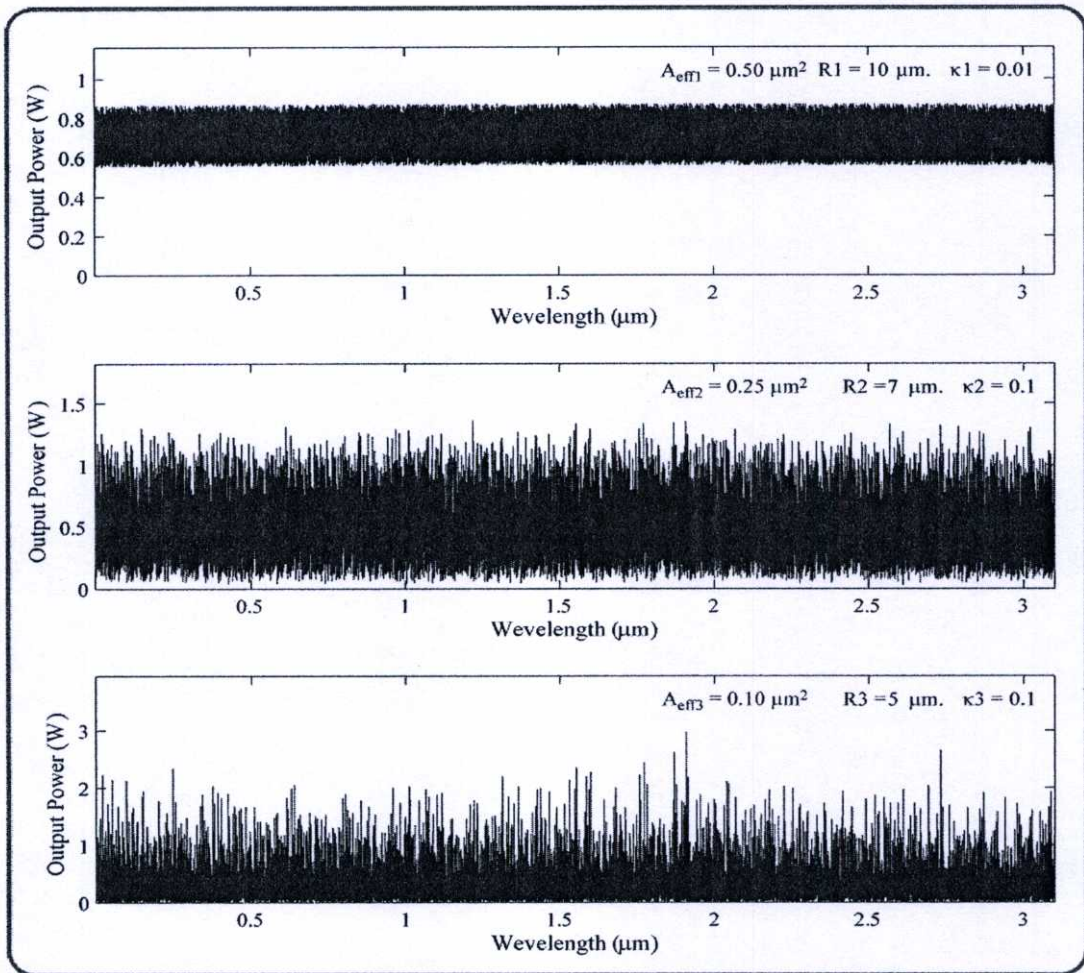
#### 4.3 การสร้างแถบความยาวคลื่นแบบต่อเนื่องโดยใช้สัญญาณอินพุตเป็นโซลิตอนโดยอาศัยวงแหวนขนาดเล็กระดับนาโนเมตร

การจำลองผลของดัชนีหักเหแบบไม่เป็นเชิงเส้น GaInAsP/InP ( $n_2$ ) ของแกนท่อนำคลื่นแสงชนิดโหมคเดี่ยวมีค่าอยู่ที่  $2.2 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{W}$  ที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กชนิดโหมคเดี่ยว โดยกำหนดให้การเปลี่ยนแปลงเฟสแบบเชิงเส้นคงที่ ( $\phi_L = 0$ ) รัศมีของวงแหวน 10 - 30  $\mu\text{m}$  อัตราส่วนการคับปลิงกำลังแสง ( $\kappa$ ) เป็น 0.001 - 0.99 พื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่นแสง ( $A_{\text{eff}}$ ) เป็น 0.10 - 0.50  $\mu\text{m}^2$  สัญญาณเป็นพัลส์โซลิตอนโดยให้อินพุตมีกำลัง (Pin) เป็น 650 mW และ ความยาวคลื่นกลาง ( $\lambda_0$ ) คือ 1550 นาโนเมตร โดยแผนผังในการทำงานวิจัยสำหรับการสร้าง SHG จากการกรองโดยใช้โพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กดังรูปที่ 4.12



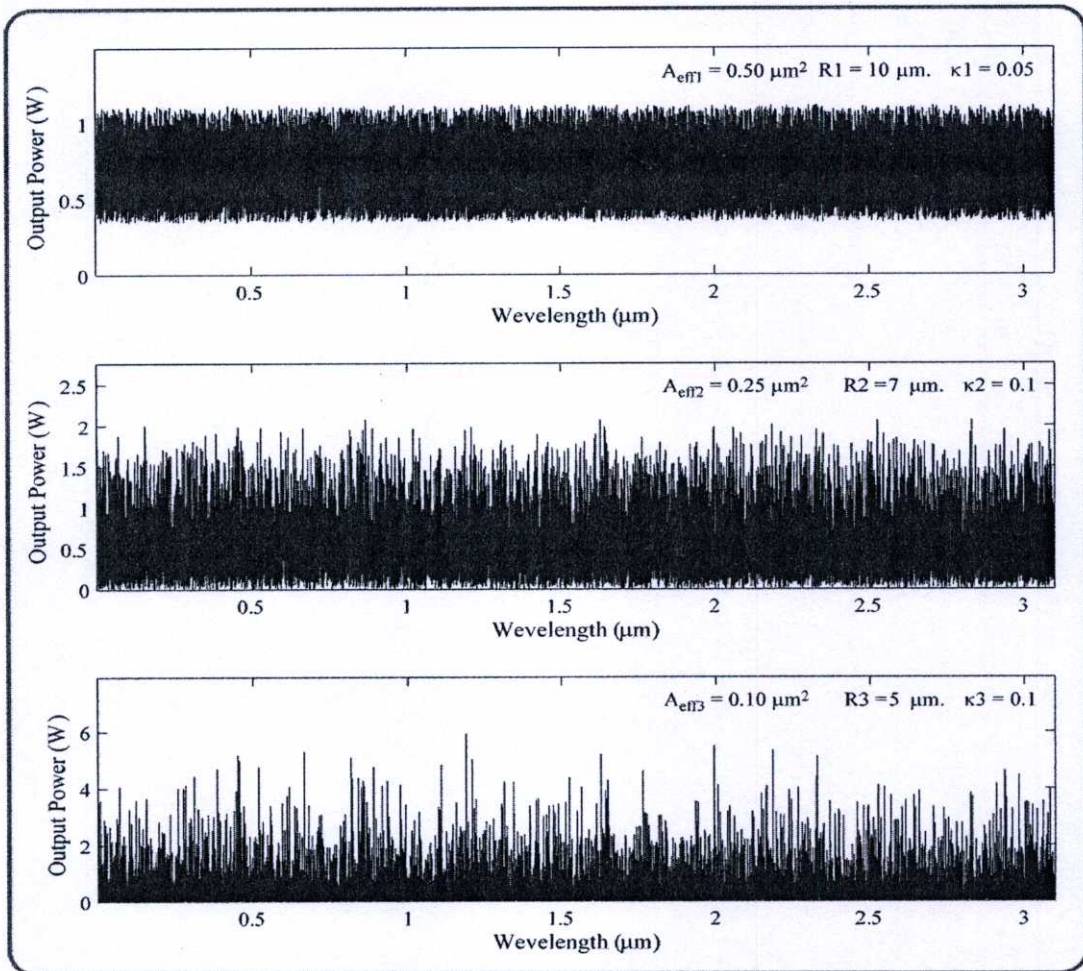
รูปที่ 4.12 แบบจำลองการกรองของโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กเมื่ออินพุตเป็น โซลิตอนสำหรับโพรงสั่นพ้องระดับนาโนเมตร

โดยการสร้างแถบความยาวคลื่นแบบต่อเนื่อง อาศัยความไม่เป็นเชิงเส้นของเนื้อสารที่ใช้ทำท่อนำคลื่นแสงของโพรงสั่นพ้อง และ คุณสมบัติของโซลิตอน โดยในวงแหวนแรก  $R_1$  และ  $K_1$  วงแหวนเริ่มต้นที่สำคัญในการสร้างการเกิดความไม่เป็นเชิงเส้น ส่วนของโพรงสั่นพ้องวงแหวนที่  $R_2$  , และ  $R_3$  ทำหน้าที่ในการกรองสัญญาณที่ได้จากวงแหวน  $R_1$  ให้เหลือเฉพาะแถบความยาวคลื่นที่ต้องการที่สะอาดไม่มีการปนของความยาวคลื่นอื่นที่ไม่ต่างการออก โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของวงแหวน และ การคับปลิง ที่เหมาะสม อีกอย่างหนึ่งที่เป็นความสำคัญในการสร้างแถบความยาวคลื่นแบบต่อเนื่องคือ การเปลี่ยนค่าของพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่นแสง จาก  $A_{\text{eff}1} = 0.50 \mu\text{m}^2$  ,  $A_{\text{eff}2} = 0.25 \mu\text{m}^2$  และ  $A_{\text{eff}3} = 0.10 \mu\text{m}^2$  ตามลำดับ และ เพิ่มกำลังสัญญาณจาก 450 mW เป็น 650 mW เพื่อสร้างแถบความยาวคลื่นที่เกิดให้มากขึ้น



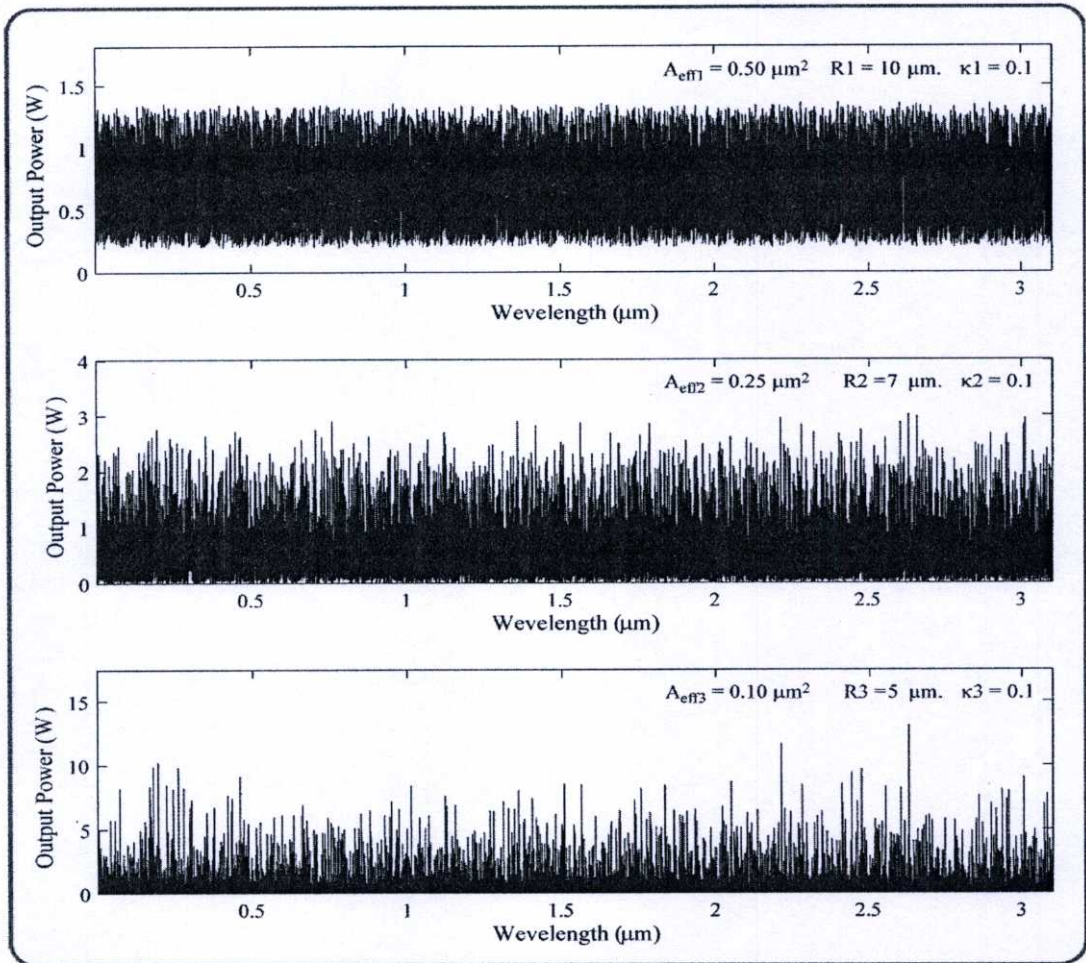
รูปที่ 4.13 แสดงสัญญาณเคออสเมื่อผ่านการกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกัน มีรัศมี  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_3$  คือ 10, 7 และ 5 ไมครอน ค่าคัปปลิง  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$  เป็น 0.01, 0.1 และ 0.1

การสร้างแบบจำลองนี้ใช้สัญญาณของพัลส์โซลิตอนโดยให้อินพุทมีกำลัง 650 mW พื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่นแสงจาก  $A_{eff1} = 0.50 \mu\text{m}^2$ ,  $A_{eff2} = 0.25 \mu\text{m}^2$  และ  $A_{eff3} = 0.10 \mu\text{m}^2$  ตามลำดับ ความยาวคลื่นกลาง ( $\lambda_0$ ) คือ 1550 นาโนเมตร โพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_3$  คือ 10, 7 และ 5 ไมครอน ค่าคัปปลิง  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$  เป็น 0.01, 0.1 และ 0.1 เมื่อสัญญาณเริ่มต้นเป็น 1550 นาโนเมตร จากกราฟของสร้างแบบจำลองแสดงแถบของความยาวคลื่นเกิดขึ้นมากมายเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานให้เหมาะสม โดยระบบที่ได้ยังไม่มีการกรองแถบความคลื่นใดคลื่นหนึ่งเป็นหลักแต่เป็นการศึกษาพฤติกรรมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่น จากกราฟจะเห็นได้ว่าสัญญาณถูกขยายขึ้นจากสัญญาณที่อินพุทเข้าไป



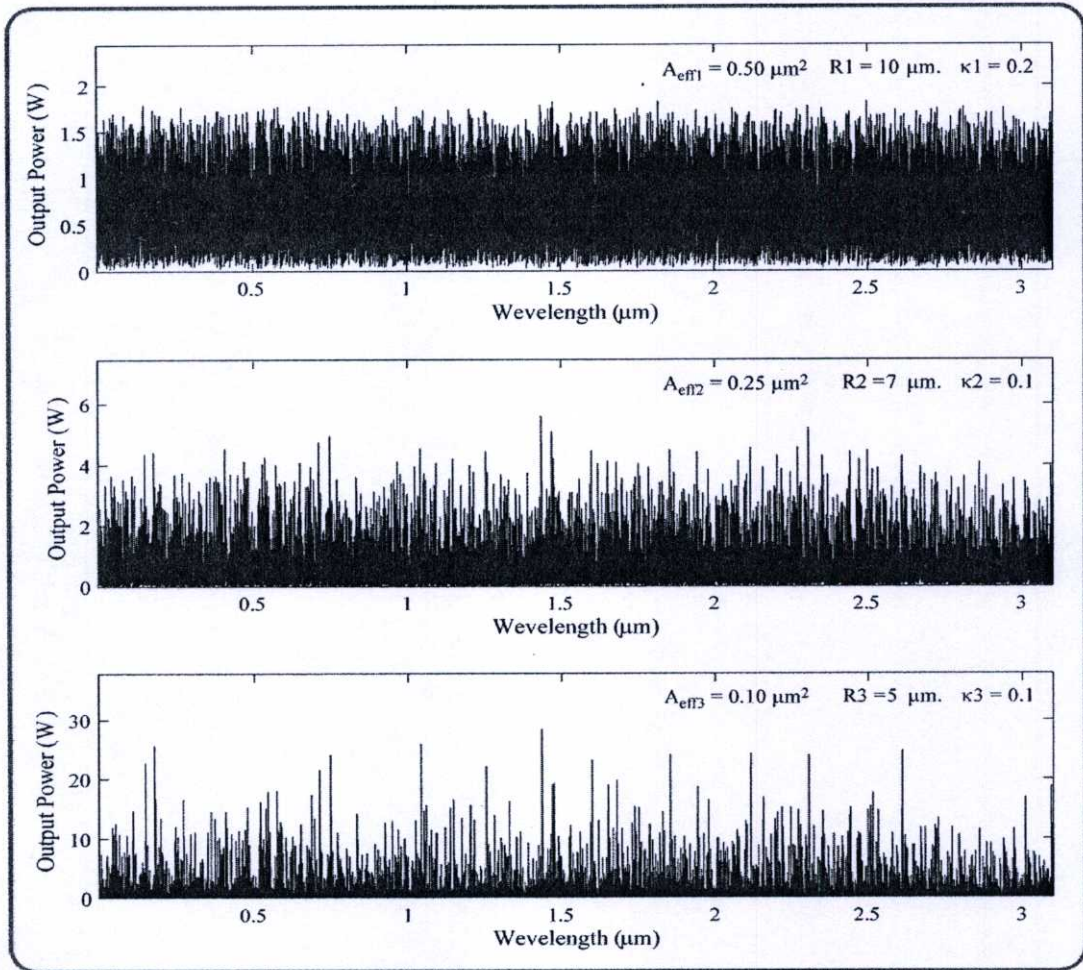
รูปที่ 4.14 แสดงสัญญาณเคออสเมื่อผ่านการกรองด้วยโครงสร้างแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกัน มีรัศมี  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_3$  คือ 10, 7 และ 5 ไมครอน ค่าคัปปลิง  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$  เป็น 0.05, 0.1 และ 0.1

การสร้างแบบจำลองนี้ใช้สัญญาณของพัลส์โซลิตอนโดยให้อินพุตมีกำลัง 650 mW พื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่นแสงจาก  $A_{em} = 0.50 \mu\text{m}^2$ ,  $A_{em2} = 0.25 \mu\text{m}^2$  และ  $A_{em3} = 0.10 \mu\text{m}^2$  ตามลำดับ ความยาวคลื่นกลาง ( $\lambda_0$ ) คือ 1550 นาโนเมตร โครงสร้างแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_3$  คือ 10, 7 และ 5 ไมครอน ค่าคัปปลิง  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$  เป็น 0.05, 0.1 และ 0.1 เมื่อสัญญาณเริ่มต้นเป็น 1550 นาโนเมตร จากกราฟของสร้างแบบจำลองแสดงแถบของความยาวคลื่นเกิดขึ้นมากมายเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานให้เหมาะสม โดยระบบที่ได้ยังไม่มีการกรองแถบความคลื่นใดคลื่นหนึ่งเป็นหลักแต่เป็นการศึกษาพฤติกรรมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่น จากกราฟจะเห็นได้ว่าสัญญาณถูกขยายขึ้นจากสัญญาณที่อินพุตเข้าไป



รูปที่ 4.15 แสดงสัญญาณเคออสเมื่อผ่านการกรองด้วยโปรงสันพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกัน มีรัศมี  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_3$  คือ 10, 7 และ 5 ไมครอน ค่าคัปปลิง  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$  เป็น 0.1, 0.1 และ 0.1

การสร้างแบบจำลองนี้ใช้สัญญาณของพัลส์โซลิตอนโดยให้อินพุตมีกำลัง 650 mW พื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่นแสงจาก  $A_{eff1} = 0.50 \mu\text{m}^2$ ,  $A_{eff2} = 0.25 \mu\text{m}^2$  และ  $A_{eff3} = 0.10 \mu\text{m}^2$  ตามลำดับ ความยาวคลื่นกลาง ( $\lambda_0$ ) คือ 1550 นาโนเมตร โปรงสันพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_3$  คือ 10, 7 และ 5 ไมครอน ค่าคัปปลิง  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$  เป็น 0.1, 0.1 และ 0.1 เมื่อสัญญาณเริ่มต้นเป็น 1550 นาโนเมตร จากกราฟของสร้างแบบจำลองแสดงแถบของความยาวคลื่นเกิดขึ้นมากมายเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานให้เหมาะสม โดยระบบที่ได้ยังไม่มีกรองแถบความคลื่นใดคลื่นหนึ่งเป็นหลักแต่เป็นการศึกษาพฤติกรรมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่น จากกราฟจะเห็นได้ว่าสัญญาณถูกขยายขึ้นจากสัญญาณที่อินพุตเข้าไป



รูปที่ 4.16 แสดงสัญญาณเคออสเมื่อผ่านการกรองด้วยโครงสร้างฟองแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกัน มีรัศมี  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_3$  คือ 10, 7 และ 5 ไมครอน ค่าคัปปลิง  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$  เป็น 0.2, 0.1 และ 0.1

การสร้างแบบจำลองนี้ใช้สัญญาณของพัลส์โซลิตอนโดยให้อินพุตมีกำลัง 650 mW พื้นที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่นแสงจาก  $A_{em} = 0.50 \mu\text{m}^2$ ,  $A_{em2} = 0.25 \mu\text{m}^2$  และ  $A_{em3} = 0.10 \mu\text{m}^2$  ตามลำดับ ความยาวคลื่นกลาง ( $\lambda_0$ ) คือ 1550 นาโนเมตร โครงสร้างฟองแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_3$  คือ 10, 7 และ 5 ไมครอน ค่าคัปปลิง  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$  เป็น 0.2, 0.1 และ 0.1 เมื่อสัญญาณเริ่มต้นเป็น 1550 นาโนเมตร จากกราฟของสร้างแบบจำลองแสดงแถบของความยาวคลื่นเกิดขึ้นมากมายเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานให้เหมาะสม โดยระบบที่ได้ยังไม่มีการกรองแถบความคลื่นใดคลื่นหนึ่งเป็นหลักแต่เป็นการศึกษาพฤติกรรมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงที่หน้าตัดของแกนท่อนำคลื่น จากกราฟจะเห็นได้ว่าสัญญาณถูกขยายขึ้นจากสัญญาณที่อินพุตเข้าไป

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลสำหรับอินพุทเป็นเกาส์เซียนพัลส์

การสร้างแบบจำลองของโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่มีอินพุทเป็นเกาส์เซียนพัลส์โดยให้อินพุทมีกำลัง (Pin) เป็น 450 mW , พื้นที่หน้าตัดที่นำคลื่น ( $A_{eff}$ ) เป็น  $0.50 \mu m^2$  และ ความยาวคลื่นกลาง ( $\lambda_0$ ) คือ 1550 นาโนเมตร แผนผังโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กของทำงานวิจัยสำหรับการสร้าง SHG ระบบในการกรองคือโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กต่อกันเป็นอนุกรมกันจำนวนสี่วงแหวน การสร้างแบบจำลองสำหรับโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก สามารถสรุปผลการสร้างแบบจำลองเป็นทั้ง 4 แบบสำหรับการกรอง

- 1) การกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี  $R_1, R_2, R_3$  และ  $R_4$  คือ 17, 13, 14 และ  $14 \mu m$  ค่าคัปปลิง  $K_1, K_2, K_3, K_4$  เป็น 0.995, 0.9831, 0.985 และ 0.9826 กรองเหลือความยาวคลื่น 3 ช่วง 775, 1550 และ 2325 นาโนเมตร
- 2) การกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี  $R_1, R_2, R_3$  และ  $R_4$  คือ 17, 10, 11 และ  $15 \mu m$  ค่าคัปปลิง  $K_1, K_2, K_3, K_4$  เป็น 0.995, 0.985, 0.983 และ 0.9826 กรองเหลือความยาวคลื่นช่วงเดียว 1550 นาโนเมตร
- 3) การกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี  $R_1, R_2, R_3$  และ  $R_4$  คือ 17, 15, 11 และ  $\mu m$  ค่าคัปปลิง  $K_1, K_2, K_3, K_4$  เป็น 0.995, 0.985, 0.983 และ 0.9838 กรองเหลือความยาวคลื่นช่วงเดียว 2325 นาโนเมตร
- 4) การกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี  $R_1, R_2, R_3$  และ  $R_4$  คือ 15, 18, 15 และ  $10 \mu m$  ค่าคัปปลิง  $K_1, K_2, K_3, K_4$  เป็น 0.9895, 0.9858, 0.9858 และ 0.9713 กรองเหลือความยาวคลื่นช่วงเดียว 775 นาโนเมตร

จากการสร้างแบบจำลองการกรองสัญญาณเคออสผ่านระบบโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมเพื่อสร้างสัญญาณ SHG ที่เกิดจากการกรองของโพรงสั้นพ้อง สัญญาณที่ได้จากการสร้างแบบจำลองทำการวิเคราะห์คู่ความสัมพันธ์ของอนุภาคโฟตอน ( Entangled photon ) โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทฤษฎีโจนส์เมทริกซ์ ( Jones matrix ) จากกราฟได้ว่า H และ V มีค่าเท่ากันมีสองมุมคือมุม  $45^\circ$  และ  $135^\circ$  ส่วนตำแหน่งที่  $H = 1$  และ  $V = 0$  มีอยู่สามตำแหน่งคือ  $0^\circ, 90^\circ$  และ  $180^\circ$  จากกราฟความสัมพันธ์ของ H

และ  $V$  ไม่ว่าจะเป็นที่ตำแหน่งใดก็จะมีค่าผลรวมเป็น 1 เท่ากันในทุกตำแหน่ง ซึ่งเป็นในแนวทางเดียวกันกับงานวิจัยที่ได้จากการทดลองจากห้องปฏิบัติการ

## 5.2 สรุปผลสำหรับอินพุทเป็นโซลิตอนพัลส์

การสร้างแบบจำลองของโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่มีอินพุทเป็นโซลิตอนพัลส์โดยให้อินพุทมีกำลัง (Pin) เป็น 450 mW , พื้นที่หน้าตัดหน้าคลื่น ( $A_{eff}$ ) เป็น  $0.50 \mu m^2$  และ ความยาวคลื่นกลาง ( $\lambda_0$ ) คือ 1550 นาโนเมตร แผนผังโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กของทำงานวิจัยสำหรับการสร้าง SHG ระบบในการกรองคือโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กต่อกันเป็นอนุกรมกันจำนวนสี่วงแหวน การสร้างแบบจำลองสำหรับโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็ก สามารถสรุปผลการสร้างแบบจำลองเป็นทั้ง 4 แบบสำหรับการกรอง

- 1) การกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี  $R_1, R_2$  และ  $R_3$  คือ 12, 12 และ  $19 \mu m$  ค่าคัปปลิง  $K_1, K_2, K_3$  เป็น 0.9821, 0.9821 และ 0.987 กรองเหลือความยาวคลื่น 3 ช่วง 775, 1550 และ 2325 nm
- 2) การกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี  $R_1, R_2$  และ  $R_3$  คือ 12, 15 และ  $19 \mu m$  ค่าคัปปลิง  $K_1, K_2, K_3$  เป็น 0.9821, 0.96 และ 0.97 กรองเหลือความยาวคลื่นช่วงเดียว 1550 nm
- 3) การกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี  $R_1, R_2$  และ  $R_3$  คือ 12, 15 และ  $19 \mu m$  ค่าคัปปลิง  $K_1, K_2, K_3$  เป็น 0.9821, 0.98 และ 0.93 กรองเหลือความยาวคลื่นช่วงเดียว 2325 นาโนเมตร
- 4) การกรองด้วยโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี  $R_1, R_2$  และ  $R_3$  คือ 12, 15 และ  $19 \mu m$  ค่าคัปปลิง  $K_1, K_2, K_3$  เป็น 0.9821, 0.92 และ 0.94 กรองเหลือความยาวคลื่นช่วงเดียว 775nm

จากการสร้างแบบจำลองสำหรับโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนขนาดเล็กที่มีอินพุทเป็นเกาส์เซียนพัลส์ผลการสร้างแบบจำลองความเข้มของสัญญาณที่ได้จากเกาส์เซียนพัลส์ลดลงตามลำดับ และ ได้ค่าของสัญญาณที่ไม่กว้าง จึงได้ทำการสร้างแบบจำลองต่อโดยใช้สัญญาณอินพุทให้เป็นโซลิตอนพัลส์ ความยาวคลื่นที่ได้จากการกรองเป็นสามค่าที่เกิดจากความถี่กลางของสัญญาณสำหรับ 1550 nm เป็น 775, 1550 และ 2325 nm เป็นความยาวคลื่นสำหรับ SHG โดยคุณสมบัติของโซลิตอนพัลส์ที่มี self-phase modulation และ cross-phase modulation จากผลจะได้ว่าสัญญาณมีค่าความกว้างของแถบสัญญาณที่กว้างกว่าในรูปแบบของเกาส์เซียนพัลส์ และ สัญญาณที่ได้ยังมีความเข้มของสัญญาณที่มากกว่าอีกด้วย ที่เป็นข้อดีอีกอย่างคือ สัญญาณที่ได้มีความคมของยอดสัญญาณ

ที่ต่ำกว่าของแบบเกาส์เซียนทำให้สามารถเลือกใช้ช่องสัญญาณของความถี่ได้มากกว่า จากความเข้มของสัญญาณที่มากทำให้สามารถกรองสัญญาณเพื่อนำไปใช้ในระบบได้หลายช่องสัญญาณ โดยคุณสมบัติทางควอนตัมของสัญญาณยังคงเดิม

### 5.3 สรุปผลสำหรับอินพุทเป็นโซลิตอนพัลส์ในระดับนาโนเมตร

การสร้างแบบจำลองของโพรงสี่เหลี่ยมแบบวงแหวนขนาดเล็กที่มีอินพุทเป็นโซลิตอนพัลส์โดยให้อินพุทมีกำลัง (Pin) เป็น 650 mW , ค่าของพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่นแสง จาก  $A_{cm} = 0.50 \mu m^2$  ,  $A_{cm2} = 0.25 \mu m^2$  และ  $A_{cm3} = 0.10 \mu m^2$  และ ความยาวคลื่นกลาง ( $\lambda_0$ ) คือ 1550 nm แขนงโพรงสี่เหลี่ยมแบบวงแหวนขนาดเล็กของทำงานวิจัยสำหรับการสร้าง SHG ในการกรองคือโพรงสี่เหลี่ยมแบบวงแหวนขนาดเล็กต่อกันเป็นอนุกรมกันจำนวนสี่วงแหวน การสร้างแบบจำลองสำหรับโพรงสี่เหลี่ยมแบบวงแหวนขนาดเล็ก สามารถสรุปผลการสร้างแบบจำลองเป็นทั้ง 4 แบบสำหรับการกรอง

- 1) การกรองด้วยโพรงสี่เหลี่ยมแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_3$  คือ 10, 7 และ 5  $\mu m$  ค่าคัปปลิง  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  เป็น 0.01 , 0.1 และ 0.1 กรองให้เป็นแถบความยาวคลื่นแบบต่อเนื่อง
- 2) การกรองด้วยโพรงสี่เหลี่ยมแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_3$  คือ 10, 7 และ 5  $\mu m$  ค่าคัปปลิง  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  เป็น 0.05 , 0.1 และ 0.1 กรองให้เป็นแถบความยาวคลื่นแบบต่อเนื่อง
- 3) การกรองด้วยโพรงสี่เหลี่ยมแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_3$  คือ 10, 7 และ 5  $\mu m$  ค่าคัปปลิง  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  เป็น 0.1 , 0.1 และ 0.1 กรองให้เป็นแถบความยาวคลื่นแบบต่อเนื่อง
- 4) การกรองด้วยโพรงสี่เหลี่ยมแบบวงแหวนขนาดเล็กที่ต่อแบบอนุกรมกันมีรัศมี  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_3$  คือ 10, 7 และ 5  $\mu m$  ค่าคัปปลิง  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  เป็น 0.2 , 0.1 และ 0.1 กรองให้เป็นแถบความยาวคลื่นแบบต่อเนื่อง

จากการสร้างแบบจำลองสำหรับโพรงสี่เหลี่ยมแบบวงแหวนขนาดเล็กที่มีอินพุทเป็นโซลิตอนพัลส์ให้แถบสัญญาณที่กว้าง และ สัญญาณยังมีการขยาย ทำการศึกษาโดยการเปลี่ยนแปลงค่าของพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่นเป็น  $A_{cm} = 0.50 \mu m^2$  ,  $A_{cm2} = 0.25 \mu m^2$  และ  $A_{cm3} = 0.10 \mu m^2$  เป็นลำดับจะเห็นได้ว่าสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์จะมีขนาดเล็ก จากผลของการสร้างแบบจำลองได้แถบความยาวคลื่นเป็นแบบต่อเนื่อง และ สัญญาณที่ได้เป็นการขยาย แต่สัญญาณที่ได้ยังมีความยาวคลื่นมากมายที่ยังไม่ได้ทำการกรองสัญญาณให้เหลือสัญญาณคลื่นใดคลื่นหนึ่ง ซึ่งจะได้นำมาพัฒนาต่อไปในการประยุกต์ใช้งานในแบบต่างๆ

#### 5.4 ผลที่ได้รับจากงานวิจัย

ผลที่ได้รับจากงานวิจัยคือสามารถนำแบบจำลองไปออกแบบสำหรับการสร้างอุปกรณ์ในรูปแบบของ โครงสร้างโพรงแบบวงแหวนเพื่อสร้างสัญญาณ SHG ซึ่งนำไปประยุกต์ในงานในระบบของการสื่อสารทางแสง ในอนาคต ช่วยในการสร้างควมถี่ของสัญญาณสำหรับช่องสัญญาณในระบบการสื่อสาร จากการสร้าง แบบจำลองของสัญญาณในรูปแบบของความยาวคลื่นแบบต่อเนื่องสามารถที่จะสร้างแถบของความยาวคลื่น มากมายที่ไม่จำกัดในระบบของการรับส่งสัญญาณ ที่เป็นผลที่เกิดโซลิตอนพัลส์ จากการศึกษาสถานทาง ควอนตัมของโฟตอนโดยรหัสสัญญาณเป็นแบบสุ่ม สัญญาณที่ได้จะมีความปลอดภัยในระบบสำหรับการ ลักลอบขโมยสัญญาณ ใช้ในการสร้างแถบความถี่ในการอัดสัญญาณและดาวสัญญาณเพื่อใช้ในการส่งข้อมูล นำไปประยุกต์ในการสื่อสารเชิงควอนตัมเพื่อความปลอดภัยในการถอดรหัสที่เฉพาะ

#### 5.5 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

ในการวิจัยนี้เป็นการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB version 2008a เพียงโปรแกรมเดียวโดยไม่ได้ จำลองผลโดยใช้โปรแกรมอื่น ๆ ที่มีความเสถียรมากกว่ารวมทั้งเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการจำลอง แนวทางหนึ่งที่น่าสนใจคือใช้เทคนิค FDTD (Finite Difference Time Domain) ในการวิเคราะห์ผลข้อมูลในการ จำลองผล โดยเฉพาะโครงสร้างโพรงแบบวงแหวนระดับไมโครเมตรต้องนำไป Fabricate เพื่อนำมาทดลอง ผลเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองโดยใช้คอมพิวเตอร์

## 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. Phipithirankarn 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, 2rd ED." New Jersey: Academic Press, 2004.
- [24] D. Goldstein. "Polarized Light 2rd 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, 2rd 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. Sarapat, 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  $\delta n_{NL}$  ไม่มีหน่วย หน่วยของ  $n_2$  คือ  $\text{m}^2/\text{V}^2$  ( $1.3913 \times 10^2 \text{ m}^2/\text{W}$ ) 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  $\epsilon_0$  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  $\text{m}^2/\text{W}$  และสัมพันธ์กับ  $n_2$  เป็น

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

ปกติแล้ว  $n_2$  มีหน่วยเป็น  $\text{m}^2/\text{W}$  สมการที่ (ก-2) แสดงแฟกเตอร์การแปลงกลับเฉพาะในการวัดค่า  $n_2$  ง่ายๆ บางครั้งใช้หน่วยไฟฟ้าสถิต คือ esu เราสามารถแปลงจากหน่วย esu ไปเป็นหน่วย SI โดยใช้ความสัมพันธ์

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

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  $3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$  จาก การทดลองและค่านี้ถูกนำไปใช้ศึกษาปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในใยแก้วนำแสงมากที่สุด แม้ว่า ในความเป็นจริงแล้วค่า  $n_2$  โดยปกติจะเปลี่ยนแปลงจากใยแก้วต่อใยแก้ว (fiber to fiber)

สิ่งสำคัญที่เกิดขึ้นในปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในระบบการสื่อสารเชิงแสงกลับได้รับความสนใจอีกครั้งในการวัดค่า  $n_2$  ระหว่างปี ค.ศ. 1990 โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมผลิตใยแก้วต้องการ ค่า  $n_2$  เฉพาะสำหรับแต่ละชนิดใยแก้วนำแสง เทคนิคที่แตกต่างหลายเทคนิคที่ใช้ในการวัดค่า  $n_2$  สำหรับใยแก้วนำแสงหลายชนิด ค่าที่วัดได้พบว่ามีความอยู่ในช่วง  $2.2 - 3.4 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$  จุดเริ่มต้นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นช่วงกว้างๆ ในค่า  $n_2$  สำหรับใยแก้วนำแสงนั้นคือ การเจือแกนใยแก้วนำแสง ด้วยวัสดุอื่น เช่น  $\text{GeO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  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  $n_2$  แต่อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์นี้ขึ้นอยู่กับความกว้างของพัลส์ที่ยาวกว่าหรือสั้นกว่าเวลาการตอบสนองที่สัมพันธ์กับกระบวนการที่สอดคล้อง 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  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$  บางครั้งวัดค่าได้น้อยกว่า

ลักษณะของการเกิดกระบวนการแบบไม่เป็นเชิงเส้นในตัวกลาง คือ ผลคูณของ  $IL_{eff}$  เมื่อ  $I$  คือ ความเข้มแสง และ  $L_{eff}$  คือ ความยาวยังผลของบริเวณปฏิกิริยา 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) เพราะว่าการนำคลื่นสารไดอิเล็กทริกจะมี  $w_0$  ตลอดความยาว  $L$  ของใยแก้ว ในกรณีความยาวปฏิกิริยา (interaction length)  $L_{eff}$  เป็นการจำกัดโดยการสูญเสียของใยแก้วนำแสง ( $\alpha$ ) 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) ของกระบวนการแบบไม่เป็นเชิงเส้นในใยแก้วนำแสงสามารถปรับปรุงโดยแฟกเตอร์

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

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

## ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

- 1). 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.
- 2). K. Sarapat, N. Pornsuwancharoen and P.P. Yupapin, "Entangled Photon Generated by Chaotic Signals in Micro Ring Resonators," Proceedings on NCOA-3, Bangkok, 2008.
- 3). 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)

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นาย ชันธ์ทอง สารพัฒน์
วัน เดือน ปีเกิด	27 ตุลาคม 2523
สถานที่เกิด	อ.เมือง จ.ร้อยเอ็ด 45110
ที่อยู่	60 หมู่ 8 บ้านหนองโก ต.โพธิ์ศรีสว่าง อ.โพนทอง จ.ร้อยเอ็ด 45110
ประวัติการศึกษา	เข้ารับการศึกษาระดับปริญญาตรีเมื่อ 2542 จบการศึกษาระดับปริญญาตรีเมื่อ 2546 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จากนั้นได้เข้ารับการศึกษาระดับปริญญาโทเมื่อ 2550 จบการศึกษาระดับปริญญาโทเมื่อ 2551 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง