สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

# การศึกษาการสื่อสารโซลิตอนและการประยุกต์

นางสาว พรทิพย์ อนุรัตน์
นางสาว ลลิตา มัณยานนท์

ปพ.
พ239ก
2538

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....

b19550152

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา ๒๕๓๘

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# A Study of Soliton Communication and Application

Miss Pomtip Anurat

Miss Lalita Monyanonda

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the

Requirement for the Degree of Bachelor of Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1996

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หัวข้อโครงงานพิเศษ** การศึกษาการสื่อสารโซลิตอนและการประยุกต์

**โดย** นางสาว พรทิพย์ อนุรัตน์
นางสาว ลลิตา มัณยานนท์

**ภาควิชา** ฟิสิกส์ประยุกต์

**อาจารย์ที่ปรึกษา** ผศ.ดร. ปรีชา ยุพาพิน

**ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้นับโครงงานพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต**

.....หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
(รศ. สุรพล รักวิจัย)

**คณะกรรมการโครงงานพิเศษ**

.....ประธานกรรมการ
(ผศ.ดร. ปรีชา ยุพาพิน)

.....กรรมการ
(อ. วิชาญ เตชิตธีระ)

.....กรรมการ
(ผศ. อนุพงศ์ สรุงประภา)

.....กรรมการ
(อ. อนุชิต จารุวนาวัฒน์)

**ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์**
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---|---|
| หัวข้อโครงงานพิเศษ | การกำเนิดโซลิตอนเลเซอร์ด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ |
| โดย | นางสาว พรทิพย์ อนุรัตน์ |
| | นางสาว ลลิตา มัณยานนท์ |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ผศ.ดร. ปรีชา ยุพาพิน |
| ภาควิชา | ฟิสิกส์ประยุกต์ |
| ปีการศึกษา | 2538 |


## บทคัดย่อ


ในโครงงานพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของการสื่อสารโซลิตอนทั้งที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นโดยการส่งผ่านไปในเส้นใยนำแสง และศึกษาความเป็นมาและหลักการสำคัญที่นำไปสู่การกำเนิดโซลิตอนในทางทฤษฎี รวมไปถึงความสามารถในการนำโซลิตอนไปใช้งานทั้งการส่งสัญญาณในเส้นใยนำแสงและการใช้อุปกรณ์สื่อสารทางแสง

ในส่วนของการจำลองแบบของระบบและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสื่อสารโซลิตอนด้วยคอมพิวเตอร์ เริ่มด้วยการพิจารณาในส่วนของอุปกรณ์คัปเปลอร์เส้นใยนำแสงที่ไม่เป็นเชิงเส้นทั้งแบบ 2 คอร์และ 3 คอร์ เพื่อนำไปใช้เป็นอุปกรณ์สวิทช์ซึ่งทางแสงและเป็นผลกำเนิดเลเซอร์เส้นใยนำแสงชนิด mode-locked laser ในท่อนำคลื่นประเภทช่องคู่สัญญาณจากการคัปปลิ้งเส้นใยนำแสงชนิด passive 3 คอร์ จะให้ผลของเอาท์พุทพัลส์ที่เสถียรภาพด้วยขนาดของพัลส์ที่มีความกว้างต่ำกว่า 100 fs


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---|---|
| Special Project Title | A Study of Soliton Communication and Application |
| Name | Miss. Porntip Anurat |
| | Miss. Lalita Monyanonda |
| Special Project Advisor | Asist. Prof. Dr. Preecha Yupapin |
| Department | Applied Physics |
| Acadamic Year | 1996 |

## Abstract

In this project, a computer modelling in optical fiber soliton communication is studied. The study of soliton is used to present the potential of using soliton in ransmission and fiber optic device applications.

The study begins from a study of computer modelling of the soliton transmission through two- and three- cores nonlinear fiber couplers. The nonlinear couplers analyzed are widely found in applications of switching devices and mode-locked lasers. Describtions of passively mode-locked fiber based on active nonlinear coupler are shown. The implementation of this concept for a dual-core erbium-doped fiber laser should result the stable trains of sub-100-fs pulses.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษนี้สามารถเสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลต่าง ๆดังนี้

| | |
|---|---|
| บิดาและมารดา | ที่ให้ความอุปการะในทุกด้านจนสำเร็จการศึกษา |
| ผศ. ดร. ปรีชา ยุพาพิน | ที่เป็นที่ปรึกษาและให้คำแนะนำต่าง ๆในการทำโครงงานนี้ |
| Mr. Patrick A. Buah | ที่เป็นที่ปรึกษาในเบื้องต้นและให้ข้อมูลที่จำเป็นต่าง ๆ ต่อการทำโครงงานพิเศษนี้ |
| อาจารย์ รัชภาคย์ จิตต์อารีย์ | ที่ช่วยแนะนำการเขียน abstract ในรายงานฉบับนี้ทำให้รายงานมีความสมบูรณ์ขึ้น |
| Mr. Wayne Needoba | ที่อำนวยความสะดวกโดยให้ยืมเลเซอร์พริ นเตอร์ในการพิมพ์รายงานฉบับนี้ให้เสร็จรวดเร็วยิ่งขึ้น |
| น.ส. พรศรี ตั้งพัฒนากิจเจริญ | ที่ให้ยืมคอมพิวเตอร์ใช้บ้างเป็นครั้งคราว |
| เพื่อน ๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้อง | ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนในด้านต่าง ๆ |
| น้อง คุณน้าและคุณยาย | ที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจเสมอมา |
| คณะกรรมการ | ที่ตรวจรายงานฉบับนี้ |

**ขอขอบคุณบุคคลเหล่านี้อย่างจริงใจ**

นางสาว พรทิพย์ อนุรัตน์

นางสาว ลลิตา มัณยานนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ


| | หน้า |
|---|---|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ก |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | ข |
| กิตติกรรมประกาศ | ค |
| สารบัญตาราง | ช |
| สาบัญภาพ | ซ |
| บทนำ | 1 |
| บทที่ 1 หลักการติดต่อสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง | 3 |
| 1.1 บทนำ | 3 |
| 1.2 เส้นใยนำแสง | 4 |
| 1.2.1 โครงสร้างของเส้นใยนำแสง | 4 |
| 1.2.2 ชนิดของเส้นใยนำแสง | 5 |
| 1.2.3 คุณสมบัติของเส้นใยนำแสง | 6 |
| 1.2.3.1 แบนด์วิดธ์ | 6 |
| 1.2.3.2 ท่อนำคลื่น | 7 |
| 1.2.3.3 การกระจายของคลื่น | 7 |
| 1.2.3.4 การส่งผ่านและการลดทอน | 8 |
| 1.3 ระบบการติดต่อสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง | 9 |
| 1.4 การเข้ารหัส | 10 |
| 1.5 การมอดดูเลท | 11 |
| 1.5.1 รูปแบบการมอดดูเลทแบบอนาล็อก | 12 |
| 1.5.1.1 การมอดดูเลททางแอมพลิจูด | 12 |
| 1.5.1.2 การมอดดูเลททางความถี่ | 12 |
| 1.5.1.3 การมอดดูเลททางเฟส | 12 |
| 1.5.2 รูปแบบการมอดดูเลทแบบดิจิตอล | 12 |
| 1.5.2.1 การมอดดูเลททางพัลส์แอมพลิจูด | 12 |
| 1.5.2.2 การมอดดูเลททางพัลส์โค้ด | 13 |
| 1.5.2.3 การมอดดูเลททางพัลส์โพสิชั่น | 15 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5.2.4 การมอดดูเลททางพัลส์วิดธ์ ..... 15
1.6 ข้อพิจารณาในการออกแบบระบบพื้นฐาน ..... 16
1.6.1 การสูญเสียของระบบ ..... 16
1.6.2 การวิเคราะห์แบนด์วิดธ์ ..... 17
1.7 สรุป ..... 17
บทที่ 2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับโซลิตอน ..... 19
2.1 บทนำ ..... 19
2.2 ความเป็นมาของโซลิตอน ..... 19
2.3 หลักการของโซลิตอน ..... 20
2.3.1 คุณลักษณะการกระจายของคลื่น ..... 21
2.3.2 คุณลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้น ..... 21
2.4 สรุป ..... 23
บทที่ 3 สมการโชร์ดิงเจอร์แบบไม่เชิงเส้น(Nonlinear Schrodinger Equation) ..... 24
3.1 บทนำ ..... 24
3.2 สมการคลื่นของเอนเวลลอปฟังก์ชัน ..... 24
3.3 สมการโชร์ดิงเจอร์แบบไม่เชิงเส้น ..... 26
3.4 โซลิตอนพื้นฐานและในอันดับสูงขึ้น ..... 28
3.5 สรุป ..... 32
บทที่ 4 โซลิตอนกับการประยุกต์ใช้งาน ..... 34
4.1 บทนำ ..... 34
4.2 โซลิตอนกับการสื่อสารทางแสง ..... 34
4.2.1 การกำเนิดและการส่งสัญญาณโซลิตอน ..... 36
4.2.1.1 เส้นใยนำแสง ..... 36
4.2.1.2 แหล่งกำเนิดแสง ..... 36
4.2.1.3 มอดดูเลเตอร์ ..... 39
4.2.2 พารามิเตอร์สำหรับเทคโนการส่งสัญญาณโซลิตอน ..... 40
4.2.2.1 ระยะในการกระจาย ..... 40
4.2.2.2 Normalizeed damping rate $\Gamma$ ..... 41
4.2.2.3 พีคกำลังงานของโซลิตอน ..... 41
4.2.2.4 ความจำเป็นต่อการเกิดโซลิตอนที่ $N$=1 ..... 42
4.2.3 โซลิตอนกับการทดลองส่งสัญญาณ ..... 43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3.1 การส่งสัญญาณด้วยวิธีการเชื่อมต่อ
เส้นใยนำแสงได้โดยตรง ..... 43
4.2.3.2 การส่งสัญญาณด้วยวิธีการหมุนภายในลูป ..... 44
4.2.4 หลักการออกแบบระบบการสื่อสารของโซลิตอน ..... 45
4.3 โซลิตอนในอุปกรณ์สวิทชิ่งเชิงแสง ..... 46
4.3.1 คุณลักษณะในการสวิทชิ่ง ..... 46
4.3.2 อุปกรณ์สวิทชิ่งความเร็วสูง ..... 47
4.3.3 สวิทช์แบ่งเส้นทาง ..... 49
4.3.4 ลอจิกเกท ..... 51
4.4 สรุป ..... 53
บทที่ 5 การศึกษาแบบจำลองโซลิตอนจากข้อมูลทางคอมพิวเตอร์
(Computer modeling in soliton) ..... 54
5.1 บทนำ ..... 54
5.2 แบบจำลองพื้นฐาน ..... 54
5.3 การสวิทช์ของโซลิตอนทางแสงในการคัปเปลอร์ ..... 55
ผลและการอภิปราย ..... 56
5.4 การสวิทช์ของโซลิตอนในการคัปเปลอร์เส้นใยนำแสงแบบ 3 คอร์ ..... 57
ผลและการอภิปราย ..... 58
5.5 การกำหนดโซลิตอนในช่องคู่สัญญาณของ mode-locked fiber laser ..... 59
ผลและการอภิปราย ..... 60

เอกสารสารอ้างอิง ..... 76

ภาคผนวก ก. คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเส้นใยนำแสงไดอิเลกตริก

ภาคผนวก ข. Finite element methode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 4.1 แสดงตัวอย่างการออกแบบสัญญาณโซลิตอนในช่องสัญญาณเดียว.....46
ตาราง 4.2 แสดงความแตกต่างของการทำงานระหว่างสวิทชิ่งเส้นทาง
และลอจิกเกท.....47



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญภาพ


| | | หน้า |
|---|---|---|
| รูปที่ 1.1 | แสดงโครงสร้างของเส้นใยนำแสง | 4 |
| รูปที่ 1.2 | แสดงชนิดของเส้นใยนำแสง | 5 |
| รูปที่ 1.3 | แสดงการกระจายของคลื่น | 7 |
| รูปที่ 1.4 | แสดงการเชื่อมต่อ | 10 |
| รูปที่ 1.5 | แสดงเทคนิคการเข้ารหัส | 10 |
| รูปที่ 1.6 | แสดงการแพร่กระจายของพัลส์ที่เป็นสาเหตุให้เกิดการคลาดเคลื่อนของข้อมูล | 11 |
| รูปที่ 1.7 | แสดงการมอดดูเลทแบบ PAM | 13 |
| รูปที่ 1.8 | แสดงการมอดดูเลทแบบ PCM | 14 |
| รูปที่ 1.9 | แสดงเทคนิค PPM และ PWM | 15 |
| รูปที่ 2.1 | แสดงเซิร์พของความถี่เนื่องจาก Self- phase modulation | 22 |
| รูปที่ 3.1 | แสดงฟังก์ชันเอนเวลลอป $A(z,t)$ และสนามไฟฟ้า $E(z,t)$ | 25 |
| รูปที่ 3.2 | แสดงการพัฒนาโซลิตอนอันดับ 3 ($N$=1 ) บนคาบของโซลิตอน | 29 |
| รูปที่ 3.3 | แสดงการจำลองการกำเนิดอินพุทพัลซ์แบบเกาส์เซียล(Guassian pluse) ที่ $N$=1 เมื่อกำหนดให้ | 31 |
| รูปที่ 3.4 | แสดงการพัลส์ที่มีการมีค่า $N$=1.4 ช่วง $\xi$= 1-10ไม่เป็นโซลิตอนพื้นฐาน($N$=1) ด้วยการปรับพีคกำลังงานและความกว้างพัลส์ | 32 |
| รูปที่ 4.1 | แสดงระบบสื่อสารการด้วยโซลิตอน | 35 |
| รูปที่ 4.2 | แสดงการจัดเครื่องมือสำหรับการส่งสัญญาณโซลิตอนด้วย EDFA | 43 |
| รูปที่ 4.3 | แสดงการจัดเครื่องมือในการส่งสัญญาณโซลิตอนด้วยการติดตั้งให้มีการหมุนเวียนภายในลูป | 44 |
| รูปที่ 4.4 | แสดงอุปกรณ์สวิทชิ่ง | 48 |
| รูปที่ 5.1 | แสดงโครงสร้างของเส้นใยนำแสงชนิดคัปเปลอร์ | 54 |
| รูปที่ 5.3.1 | แสดงค่าการทะลุผ่านกับพีคของกำลังงานอินพุทในการสวิทช์ภายใต้อิทธิพลของการกระจายแบบปกติและไม่ปกติ | 62 |
| รูปที่ 5.3.2 | แสดงการส่งผ่านสัญญาณกับพีคกำลังงานอินพุทในการคัปปลิ้งแบบ 2 คอร์ | 63 |
| รูปที่ 5.3.3 | แสดงการสวิทช์ในการคัปปลิ้งเส้นใยนำแสงไม่เชิงเส้น | |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิด active ด้วยค่าอัตราขยายที่แตกต่างกัน..... 64
รูปที่ 5.4.1 แสดงการทะลุผ่านสัญญาณกับพีคกำลังงานอินพุทใน
การคัปปลิ้งแบบ 3 คอร์..... 65
รูปที่ 5.4.2 แสดงค่าการทะลุผ่านในฟังก์ชันของพีคกำลังงาน
ด้วยอัตราขยายที่แตกต่างกัน
(a) ในคอร์ที่ 1..... 66
(b) ในคอร์ที่ 2..... 67
(c) ในคอร์ที่ 3..... 68
รูปที่ 5.4.3 แสดงลักษณะสัญญาณในช่วงกำลังงานสูงของ
(a) การคัปเปลอร์เส้นใยนำแสงชนิด passive (G=0)..... 69
(b) การคัปเปลอร์เส้นใยนำแสงชนิด active (G=2)..... 70
รูปที่ 5.5.1 แสดงความเข้มของพัลส์หลังจากเดินทางไปกลับ 3 รอบ
(a) ภายใน active core คอร์ที่ 1..... 71
(b) ภายใน active core คอร์ที่ 3..... 72
(b) ภายใน active core คอร์ที่ 3..... 73
รูปที่ 5.5.2 แสดงคาบเวลาของขบวนพัลส์ ด้วย T=2, $u_0$=2 ..... 74
รูปที่ 5.5.3 แสดงสเปกตรัมของพัลส์หลังจากเดินทางได้ 3 รอบ..... 75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน

แม้ว่าการสื่อสารทางสาย (wire communication) ยังคงใช้สายโคแอคเชียล(coaxial cable) และสายไขว้คู่ (twist pair) อยู่ แต่การสื่อสารระบบนี้ได้ลดลงไปอย่างมาก เนื่องมาจากเทคโนโลยีเส้นใยนำแสงได้เข้ามามีบทบาทมากขึ้น ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าเส้นใยนำแสงมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา ปราศจากการรบกวนของคลื่นวิทยุและไม่ขึ้นกับความแปรปรวนของสภาพดินฟ้าอากาศ ทั้งยังสามารถส่งสัญญาณข้อมูลได้มากเนื่องจากเส้นใยนำแสงมีช่วงแบนด์วิทธ์ที่กว้าง แต่เนื่องจากการรส่งข้อมูลผ่านเส้นใยนำแสงจะเกิดการรสูญเสีย(loss)คลื่น ทำให้แสงเกิดการลดกำลังลงตามระยะทางทำให้ต้องมีตัวขยายสัญญาณติดตั้งเป็นระยะ ๆ เมื่อมีการส่งข้อมูลเป็นระยะทางไกล ๆ เพื่อกำจัดปัญหานี้จึงมีความพยายามทำให้เกิดการสูญเสียน้อยที่สุด ปัจจุบันเส้นใยนำแสงมีค่าการสูญเสียที่น้อยที่สุดมีค่าประมาณ 0.01 dB/km ซึ่งเป็นค่าการสูญเสียที่มากอยู่ ดังนั้น "โซลิตอน" จึงเป็นที่สนใจอย่างมาก

โซลิตอนหรือคลื่นโซลิตอนมีคุณสมบัติที่สำคัญคือสามารถเดินทางไปได้ระยะทางไกล ๆ โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่น ได้มีการค้นพบคลื่นโซลิตอนครั้งแรกจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติจึงได้มีการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของโซลิตอนเรื่อยมา โดยมีการศึกษาเกี่ยวกับสมการทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายคุณสมบัติดังกล่าวของโซลิตอนและประยุกต์ใช้โซลิตอนกับเส้นใยนำแสงพบว่าสามารถสร้างโซลิตอนให้เกิดขึ้น เพื่อนำไปใช้งานกับระบบสื่อสารและนอกจากนี้ยังประยุกต์ใช้โซลิตอนกับอุปกรณ์สวิทชิ่งทางแสงด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์ในการทำโครงงาน

- เพื่อศึกษาสมการโชร์ดิงเจอร์แบบไม่เชิงเส้นเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป
- เพื่อศึกษาการกำเนิดโซลิตอนในเส้นใยนำแสง
- เพื่อศึกษาคุณสมบัติของโซลิตอน
- เพื่อศึกษาและวิเคราะห์สัญญาณเอาท์พุทจากรูปแบบการจำลองโซลิตอนจากโปรแกรม
- เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับอุปกรณ์อิเลคทรอนิกส์ทางแสงของโซลิตอน

## 1.3 วิธีการดำเนินงาน

- เริ่มจากศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับโซลิตอนจากตำราต่างประเทศ
- เขียนรายงานส่งอาจารย์ทุก ๆ อาทิตย์จากข้อมูลที่ได้ศึกษามา
- นำรายงานที่ได้รับคืนมาแก้ไข

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- ได้ความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติของโซลิตอน
- ได้ความรู้เกี่ยวกับหลักการเกิดโซลิตอนในเส้นใยนำแสง
- ความรู้ที่ได้รับจะเป็นพื้นฐานในการนำมาประยุกต์ใช้ในการสื่อสารข้อมูลและพัฒนาอุปกรณ์โฟโต้นิกส์ต่าง ๆ ที่จะมีขึ้นในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1
# หลักการติดต่อสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง

## 1.1 บทนำ

ประวัติการสื่อสารทางแสงนั้นเริ่มด้วยนักวิทยาศาสตร์และวิศวกรการสื่อสารได้พยายามค้นคว้าเกี่ยวกับการส่งสัญญาณแสง (light transmission) ผ่านชั้นบรรยากาศมาก่อนแต่ไม่ค่อยประสบความสำเร็จนัก เพราะแสงถูกลดทอน (attenuation) ในชั้นบรรยากาศลงไปมาก การส่งแสงโดยผ่านชั้นบรรยากาศจึงถูกจำกัดเฉพาะระยะทางการสื่อสารสั้น ๆ ต่อมาจึงได้หันมาทำวิจัยการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วปรากฏว่าได้ผลเป็นที่น่าพอใจ ทั้งนี้เพราะเส้นใยแก้วจะลดทอนกำลังงานแสงลงน้อยมาก ในปี 2513 บริษัท คอนนิงกลาส จำกัด แห่งสหรัฐอเมริกาได้ค้นพบกรรมวิธีการผลิตเส้นใยนำแสงที่ทำให้เกิดการสูญเสียในเส้นใยนำแสงต่ำมาก ๆ จนปัจจุบันมีการสูญเสียเพียง 0.01 dB/km ซึ่งเหมาะกับการสื่อสารในระยะทางไกล

**ข้อดีของเส้นใยนำแสง**

1) <u>แบนด์วิดธ์กว้าง</u>

ความกว้างของแบนด์วิดธ์ของเส้นใยนำแสงทำให้ข้อมูลมีอัตราเร็ว บนเส้นใยนำแสงเส้นหนึ่ง ๆ จะสามารถนำข้อมูลเสียงได้นับพันช่องสัญญาณผ่านไปบนระบบโทรศัพท์ที่ใช้เส้นใยนำแสงนี้ นอกจากนั้นอัตราเร็วของข้อมูลยังได้ให้ประสิทธิภาพต่อการใช้ช่องสัญญาณ(channel) ในการติดต่อสื่อสารในคอมพิวเตอร์และระบบเครือข่ายท้องถิ่น (Local Area Network :LAN)

2) <u>การสูญเสียต่ำ</u> (low loss)

เส้นใยนำแสงจะมีการลดทอนของสัญญาณที่ต่ำ ยกตัวอย่างเช่น เส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว (single mode fiber) จะมีการสูญเสียน้อยกว่า 1 dB/km ซึ่งการสูญเสียต่ำนี้จะให้การเชื่อมต่อไปเป็นระยะทางไกลโดยไม่จำเป็นต้องมีการขยายสัญญาณด้วยตัวขยายสัญญาณ (repeater) อีกทั้งการลดทอนของสัญญาณในเส้นใยนำแสงจะไม่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ของการมอดดูเลทเช่นเดียวกับเส้นลวดทองแดง ดังนั้นความยาวของการเชื่อมต่อจึงลดลง

3) <u>ไม่เกิดการรบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า</u>

เนื่องจากเส้นใยนำแสงเป็นวัตถุที่ไม่เป็นสื่อทางไฟฟ้า(dielectric)จึงไม่มีผลต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยเส้นใยนำแสงนี้จะไม่รับหรือส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใด ๆ ทั้งสิ้น จึงไม่ทำให้เกิดการรบกวนกันของสัญญาณ (cross talk) ขณะส่งสัญญาณและไม่มีการผิดเพี้ยนแม้จะอยู่ในสภาพแวดล้อมทางไฟฟ้าก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ขนาดเล็กและน้ำหนักเบา

เมื่อเปรียบเทียบกับสายโคแอกเซียลแล้วจะมีขนาดเล็กกว่าและมีน้ำหนักเบากว่าทองแดง

5) มั่นคงแน่นอน

เนื่องจากมีความเป็นไปได้ต่ำที่เส้นใยนำแสงจะถูกลักลอบต่อ (tap) สายสัญญาณโดยไม่ถูกตรวจจับ เพราะเส้นใยนำแสงไม่มีการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จึงทำให้เทคนิคการลอบดักฟังไม่มีผลต่อระบบการส่งสัญญาณ

6) ปลอดภัย

เนื่องจากคุณสมบัติที่ไม่เป็นสื่อทางไฟฟ้าของเส้นใยนำแสงและไม่นำกระแสไฟฟ้าจึงทำให้ไม่เกิดอันตรายในด้านประกายไฟ ทำให้สามารถนำไปใช้ในสภาพแวดล้อมที่ไวไฟหรือติดระเบิดได้

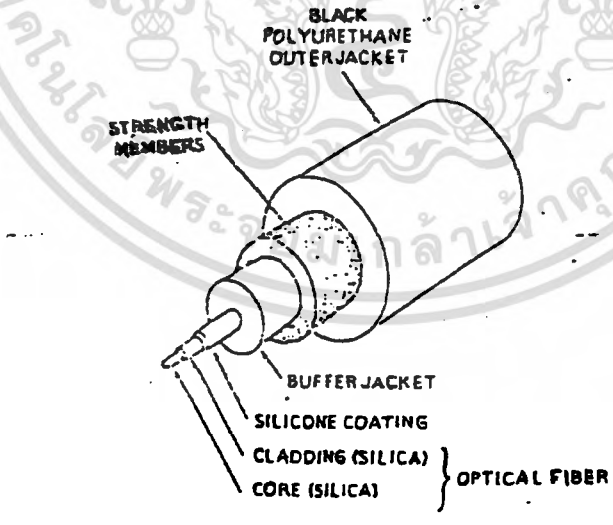
7) ราคาต้นทุน

แม้ราคาแรกเริ่มในการติดตั้งจะราคาสูงกว่าสายทองแดงมาก แต่ก็จะลดลงเรื่อย ๆ และเมื่อนำเอาสมรรถภาพและราคามาคำนึงจะเห็นว่าเส้นใยนำแสงจะแพงน้อยกว่า

## 1.2 เส้นใยนำแสง

### 1.2.1 โครงสร้างของเส้นใยนำแสง

โดยทั่วไปแล้วเส้นใยนำแสงเป็นเส้นรูปทรงกระบอกขนาดเล็กคล้ายเส้นผมทำจากแก้วหรือพลาสติก โครงสร้างพื้นฐานของเส้นใยนำแสงประกอบด้วย




**รูปที่1.1 แสดงโครงสร้างของเส้นใยนำแสง**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**core** ซึ่งเป็นเส้นใยนำแสงชั้นในสุดที่เป็นส่วนตรงกลางและมีค่าดัชนีหักเหของแสงสูง

**cladding** เป็นส่วนหุ้มด้านนอกที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำกว่าคอร์

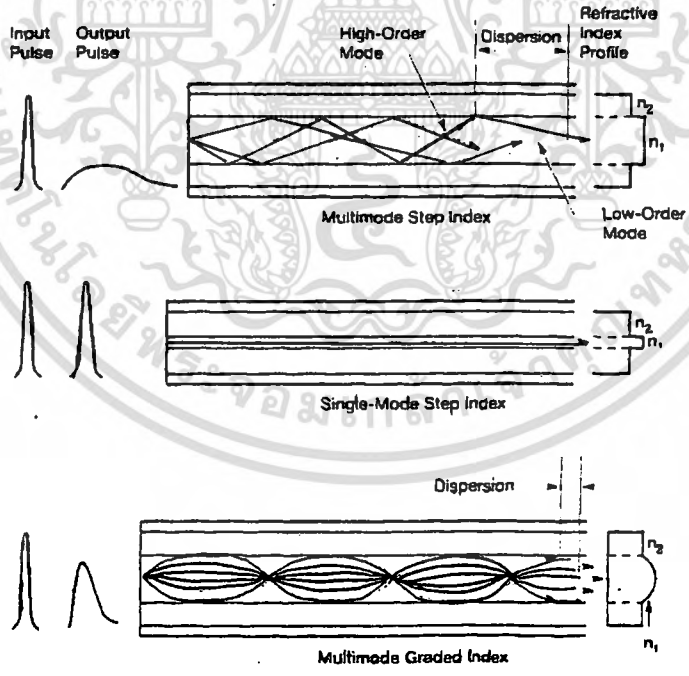
**buffer** จะห่อหุ้มเป็นชั้นที่สาม เพื่อป้องกันคุณสมบัติทางแสงของcladding และ core

**member & jacket** จะห่อหุ้มเป็นชั้นถัดไป เพื่อความคงรูปทรงของเส้นใยนำแสง

### 1.2.2 ชนิดของเส้นใยนำแสง

การแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสงสามารถแบ่งได้หลายวิธีโดยแบ่งตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเห, แบ่งตามจำนวนโหมด(mode), แบ่งตามสารที่ใช้ผลิตหรือแบ่งตามกรรมวิธีการผลิต อย่างไรก็ตาม เส้นใยนำแสงสามารถแบ่งออกตามลักษณะ reflective index profile ได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ดังรูป 1.2 คือ

- เส้นใยนำแสงชนิด multimode step index (SI)
- เส้นใยนำแสงชนิด multimode geaded index (GI)
- เส้นใยนำแสงชนิด singlemode step index (SSI)




**รูปที่1.2 ชนิดของเส้นใยนำแสง**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Step Index multimode fibers**

เส้นใยนำแสงมีเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนอยู่ในช่วง 50 $\mu$m-1000 $\mu$m และด้วยขนาดของ core นี้จะสนับสนุนการแพร่ทางแสงในหลายโหมดด้วยเส้นทางที่แตกต่างซึ่งจะให้ค่าการแพร่กระจายของโหมดมีค่าสูงขึ้น (modal dispersion) มีผลให้เกิดการกว้างออกของกระจายตลอดเวลาในขณะที่แสงเดินทางผ่านเส้นใยนำแสง การแพร่กระจายนี้เป็นกลไกหลักที่จำกัดแบนด์วิดธ์ดังนั้นความสามารถในการนำข้อมูลของเส้นใยนำแสงแบบ Step - Index multimode จึงขึ้นกับประเภทของวัตถุส่วนประกอบที่นำมาทำเป็นเส้นใยนำแสง

**Gradded - Index fibers**

เส้นใยนำแสงชนิดนี้จะมีรูปลักษณะดัชนีหักเหของแกนที่เปลี่ยนไปทีละน้อยโดยค่าดัชนีจะมีค่าสูงสุดตรงกลางและลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงรอยต่อระหว่าง core และ cladding โดยความแตกต่างระหว่างเส้นใยนำแสงชนิด gradded-index กับเส้นใยนำแสงชนิด step-index คือ แสงจะสะท้อนตามขวาง index gradient แล้วจะโค้งกลับอย่างต่อเนื่องไปทางศูนย์กลาง เนื่องจากแสงเดินทางได้เร็วกว่าในตัวกลางที่มีดัชนีหักเหต่ำ ดังนั้นแสงที่ไกลจากแกนศูนย์กลางจะเดินทางได้เร็วกว่าแสงเหล่านี้จะเดินทางไปตามเส้นทางที่ยาวที่สุดด้วยความเร็วเฉลี่ยที่เร็วที่สุด ดังนั้นทุกโหมดจึงมักถึงจุดใด ๆ เกือบจะเป็นเวลาเดียวกัน ด้วยเหตุนี้การลดลงของการแพร่กระจายนี้ทำให้ได้เส้นใยนำแสงที่มีแบนด์วิดธ์สูงขึ้น

**Singlemode fiber**

เป็นแนวทางหนึ่งที่จำกัดการแพร่กระจาย (modal dispersion) เส้นใยนำแสงประเภทนี้จึงมีเส้นผ่านศูนย์กลางของคอร์ที่เล็กประมาณ 5-15 $\mu$m เส้นใยนำแสงชนิดนี้มีแบนด์วิดธ์มากมายและมีการสูญเสียต่ำ จึงทำให้เหมาะสมในการติดต่อสื่อสารในระยะทางไกลด้วยความเร็วสูง

**1.2.3 คุณสมบัติเส้นใยนำแสง**

**1.2.3.1 แบนด์วิดธ์ (Bandwidth)**

เส้นใยนำแสงที่มี numerical aperture และเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่จะยอมให้แสงแพร่เดินทางได้ดีกว่า องค์ประกอบทั้ง 2 จะยอมให้แสงถูกคัปเปิ้ลเข้าไปในเส้นใยนำแสงและเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่จะทำให้โหมดต่าง ๆ ถูกกระตุ้นและนำพาพลังงานไป อย่างไรก็ตามเส้นใยนำแสงแบบ step-index ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่จะถูกจำกัดเมื่อเทียบกับพารามิเตอร์ของความจุข้อมูลในการติดต่อสื่อสาร ผลการรบกวนต่างๆในเส้นใยนำแสงชนิด step-index และการกระจายภายในเส้นใยนำแสง ได้ลดผลของแบนด์วิดธ์กับระยะทางถึง 20MHz-km

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อจำกัด 20 MHz-km นี้หมายความว่าการเชื่อมต่อเส้นใยนำแสงยาว 10 km ที่ไม่มีเครื่องขยายสัญญาณจะมีแบนวิดธ์เพียง 2 MHz วิธีการผลิตเฉพาะที่ผลิต graded-index core สามารถให้ผลให้ผลเกินกว่า 2 MHz (สองลำดับขอ ินาดตลอดทั้ง graded-index multimode)และยังทำให้สามารถนำพลังงานของการทำงานในหลายโหมดมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่

### 1.2.3.2 ท่อนำคลื่นเส้นใยนำแสง (waveguide)

เส้นใยนำแสงมีแกนที่มีค่าดัชนีหักเห $n_1$ ล้อมรอบด้วย cladding ที่มีค่าดัชนีหักเหที่น้อยกว่า คือ $n_2$ ท่อนำคลื่นเส้นใยนำแสงชนิด step-index จะมีหลายโหมดของรังสีที่ผ่านไปภายในท่อนำคลื่นจะแพร่เดินทางด้วยมุมสะท้อนที่แตกต่างกันเรียกว่าโหมดของการแพร่

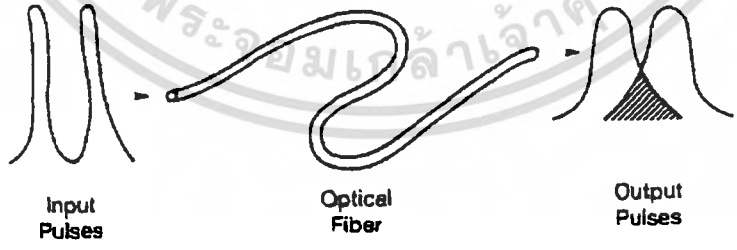
จำนวนของโมดที่ยังคงอยู่ในท่อนำคลื่นหาได้ด้วยวิธีเชิงตัวเลขและสามารถหาได้โดยวิธีกา รพล็อตโดย Gloge แนวแกนนอนอยู่ในเทอมของ normalized frequency ซึ่งหาได้จากพารามิเตอร์ดังนี้

$$V=d\pi(NA)/\lambda \qquad (1.1)$$

เมื่อ $\lambda$ เป็นความยาวคลื่นในอวกาศของแสง d คือเส้นผ่าศูนย์กลางแกน $0 \leq V \geq 2.405$ สำหรับการแพร่เดินทางในโมดเดี่ยวแล้ว $V \leq 2.4$ การเดินทางแบบหลายโหมดจะเกิดขึ้น

### 1.2.3.3 การกระจายออกของรูปคลื่น (Dispersion)

การสูญเสียพลังงานในเส้นใยนำแสงปัจจุบันมีค่าต่ำกว่า 1 dB แต่อย่างไรก็ตามข้อจำกัดที่สำคัญที่ใช้สำหรับการติดต่อสื่อสารข้อมูลความเร็วสูง คือการผิดเพี้ยนของพัลส์อันเนื่องจากการกระจายในท่อนำคลื่น




**รูปที่1.3 แสดงการกระจายของคลื่น(dispersion)**

1) ***Modal dispersion*** : เป็นการขยายกว้างของรูปคลื่นที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเร็วในการเดินทางของโหมดต่าง ๆ ไม่เท่ากันทำให้แสงเดินทางด้วยมุมที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีของเส้นใยนำแสงชนิดหลายโหมดแบบ step index จะมีการกระจายของพัลส์ออกมาก เมื่อพัลส์ของแสงถูกป้อนให้แก่เส้นใยนำแสงแบบ multimode step-index พลังงานจะถูกแบ่งออกให้แก่โหมดในการแพร่ต่างๆ กรณีนี้เมื่อมองโหมดในการแพร่แต่ละแนวแกนจะเห็นว่าเดินทางด้วยความเร็วต่างๆ กัน ดังนั้นเวลาที่โหมดในการแพร่แต่ละอันเดินทางไปยังปลายด้านหนึ่งของเส้นใยนำแสงจะมีค่าต่างกันทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนทางเวลาขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุของการกระจายออกของรูปคลื่น

2) ***Chromatic dispersion*** : Modal dispersion จะเป็นส่วนสำคัญในการกระจายออกของพัลส์ใน step-index multimode แต่นอกจากการกระจายชนิดนี้แล้วยังมีการกระจายอีก 2 ชนิดที่รวมแล้วเรียกว่า chromatic dispersion คือ material dispersion และ waveguide dispersion

❖ **Material dispersion**

ค่าดัชนีหักเหของแก้วที่ใช้ผลิตเส้นใยนำแสงจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่นแสงที่เดินทางในเส้นใยนำแสงจึงเป็นสาเหตุให้เกิดการขยายออกของรูปคลื่นทั้งนี้เพราะว่าแสงที่ปล่อยจากแหล่งกำเนิดนั้นไม่มีความยาวคลื่นเดียวแต่มีความยาวคลื่นช่วงหนึ่ง กรณีที่ค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่นและเมื่อป้อนแสงที่มีความยาวคลื่นช่วงหนึ่งเข้าไปในเส้นใยนำแสงจะทำให้แสงเดินทางไปถึงอีกปลายด้านหนึ่งด้วยเวลาต่างกันด้วยความเร็วในการเดินทางไม่เท่ากันทำให้เกิดการขยายออกของรูปคลื่น

❖ **Waveguide dispersion**

เนื่องจากความเร็วของโหมดในการแพร่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเส้นใยนำแสง ด้วยอัตราส่วนของค่าดัชนีหักเหของ core และ cladding และความยาวคลื่นแสง ดังนั้นจึงเกิดการขยายออกของรูปคลื่น

**1.2.3.4 การส่งผ่านและการลดทอน (Transmission and Attenuation)**

การส่งผ่านแสงโดยใช้เส้นใยนำแสงเนื่องมาจากมีการสูญเสียแสงบางส่วน ซึ่งเรียกว่าการลดทอนของสัญญาณ (attenuation), การสูญเสียหรือการลดทอนสัญญาณในเส้นใยนำแสงมีสาเหตุมาจาก การดูดกลืนของสิ่งเจือปน(impurity)ที่หลงเหลือในเส้นใยนำแสงโดยทั่วไป 1 ในล้านส่วนอาจจะเป็น อิออนของโครเมียม ทองแดง เหล็ก แมงกานีส เป็นต้นที่ซึ่งทำให้เกิดการลดทอนกำลังสูงสุดประมาณ 1 dB/km นอกจากการลดทอนจากสารเจือปนโลหะแล้วยังเกิดจากการดูดกลืนที่เกิดขึ้นโดยไอออนของน้ำ($OH^-$)ที่เจือปนอยู่ในเส้นใยนำแสงด้วย

การโค้งงอของเส้นใยนำแสงที่น้อยกว่า 10 cm(รัศมีความโค้ง) จะเป็นสาเหตุให้รังสีของแสงหนีออกจาก core ผ่านทะลุ cladding ทำให้เกิดการสูญเสียในรูปการแผ่ของสัญญาณ (radiation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

loss) เกิดขึ้นเมื่อเส้นใยนำแสงบรรจุในสาย reinforceing cable การผิดเพี้ยนในแนวแกนเล็กน้อย ทำให้เกิดการคัปเปิ้ลจากโหมดหนึ่งไปยังอีกโหมดหนึ่ง นอกจากการสูญเสียที่เกิดจากการดูดซึมของสารและความโค้งของเส้นใยนำแสงแล้วเส้นใยนำแสงยังมีการสูญเสียเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานแบบเชิงเส้น(ตามสัดส่วนของพลังงาน) บางส่วนจากโหมดหนึ่งของเส้นใยนำแสงเรียกว่าการสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนเชิงเส้น (linear scatting)ในการแปลงพลังงานนี้จะไม่เปลี่ยนความถี่แต่ถ้าความเข้มสนาม (field intensity) ของเส้นใยนำแสงสูงมากจะเกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากโหมดหนึ่งไปโหมดหนึ่งไปหาโหมดเดิมหรือโหมดอื่นที่เดินในทิศทางไปข้างหน้าหรือถอยหลังแต่จะเปลี่ยนความถี่ด้วยเราเรียกว่า การกระเจิงแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear scattering)

การคิดค่ากำลังการสูญเสียของสัญญาณในเส้นใยนำแสงจะคิดในเทอมของเดซิเบล(dB) ซึ่งคำนวณจาก

$$dBLoss = -10 \times \log\left(\frac{P_0}{P_1}\right) \qquad (1.2)$$

เมื่อ $P_0$ คือ ค่าพลังงานเอาต์พุท

$P_1$ คือ ค่าพลังงานอินพุท

ค่าที่ได้จะเป็นลบ หมายความว่าค่าที่ได้เป็นค่าของการสูญเสียนั่นเอง

## 1.3 ระบบการติดต่อสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง

เทคโนโลยีเส้นใยนำแสง เป็นแนวทางในการพัฒนาของการติดต่อสื่อสารทางอิเลคทรอนิกส์ เส้นใยนำแสงนับได้ว่ามีคุณประโยชน์หลาย ๆ ด้านเหนือสายทองแดง ซึ่งเป็นข้อดี เสมือนเป็นสื่อกลางในการส่งผ่านข้อมูลในอนาคต เส้นใยนำแสงเป็นท่อนำคลื่น(wave guide) ที่การใช้งานส่วนใหญ่ จะเป็นการเชื่อมต่อการส่งผ่านข้อมูลของวงจรอิเลคทรอนิกส์ การเชื่อมต่อมีองค์ประกอบหลักอยู่ 3 ส่วน คือ

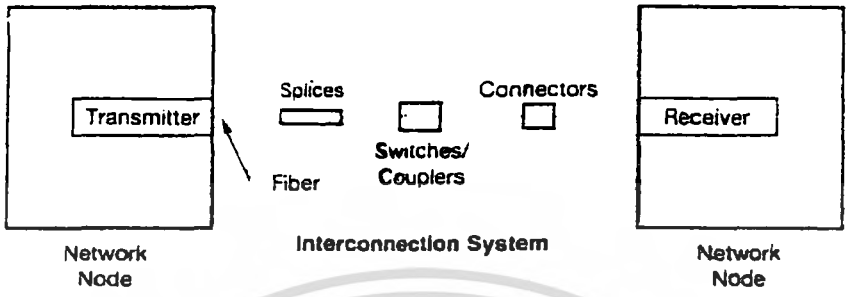
- เครื่องส่ง (Transmitter)
- เครื่องรับ (Reciever)
- ระบบการเชื่อมต่อ

<u>เครื่องส่ง</u> จะแปลงสัญญาณจากกระแสไฟฟ้าไปเป็นแสง เครื่องส่งจะประกอบด้วยวงจรขับ (driver) และแหล่งกำเนิดแสง เช่น LED หรือ เลเซอร์ไดโอด (LD)

<u>เครื่องรับ</u> จะแปลงสัญญาณแสงกลับไปเป็นสัญญาณอิเลคทรอนิกส์ เครื่องรับจะประกอบด้วยตัวตรวจวัดทางแสง (Light detector) และวงจรภาครับ

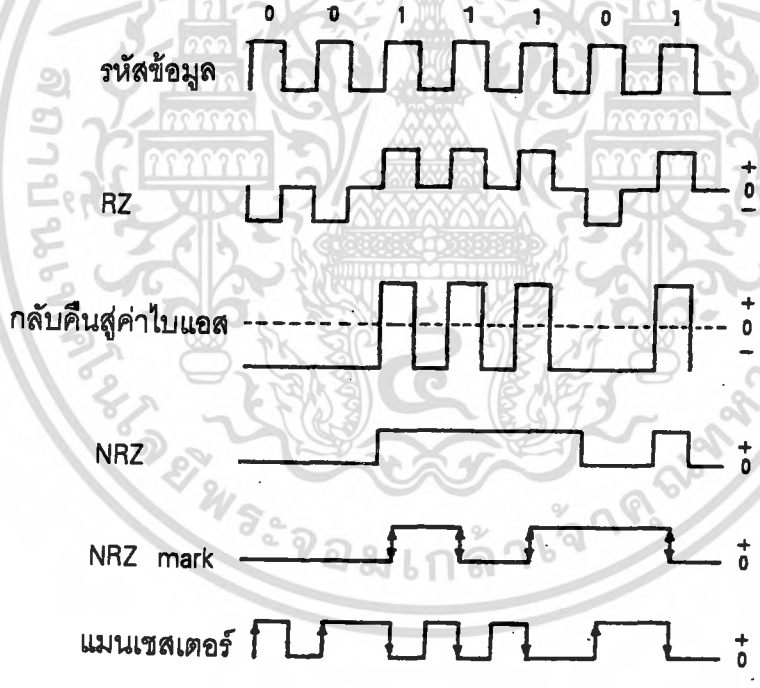
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ระบบเชื่อมต่อ</u> คือตัวกลางในการส่งผ่านข้อมูลที่เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ คือ เส้นใยนำแสง ,ข้อต่อ(connector) ฮาร์ดแวร์ที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจ่ายพลังงานให้แก่เครื่องส่งและเครื่องรับทางแสง




**รูปที่1.4 แสดงการเชื่อมต่อ**

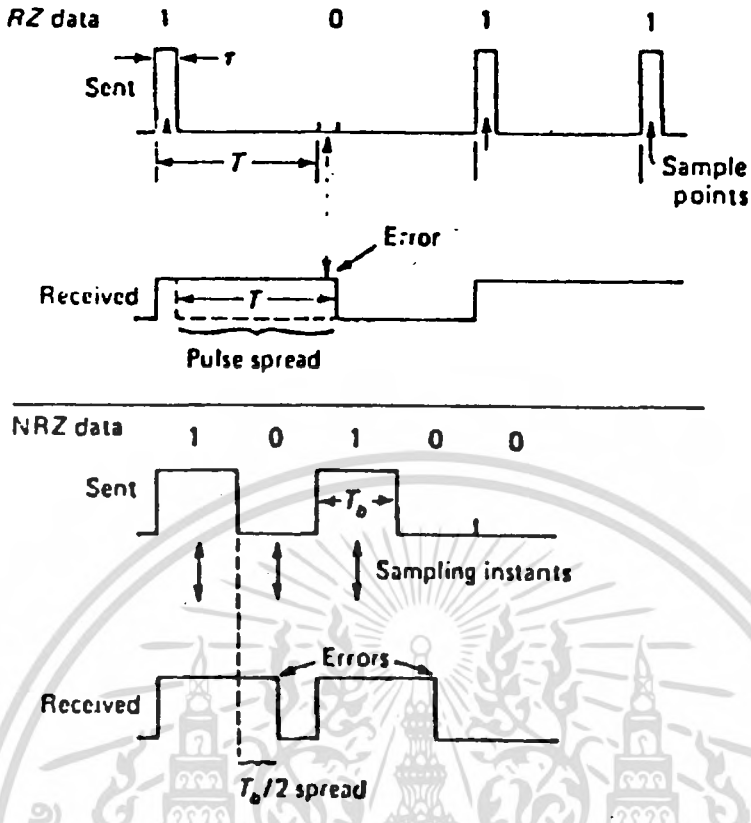
## 1.4 การเข้ารหัส




**รูปที่1.5 แสดงเทคนิคการเข้ารหัสทางดิจิตอล**

การเข้ารหัสแบบดิจิตอลที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันในระบบสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงมีอยู่หลายวิธี จากรูปแสดงตัวอย่างการเข้ารหัสข้อมูล 0011101 โดยมีระยะเวลาในการแสดงค่าข้อมูลจะถูกกำหนดด้วยสัญญาณนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่1.6 แสดงการกระจายออกของพัลส์ที่เป็นสาเหตุให้เกิดการคลาดเคลื่อนของข้อมูล**

ถ้ารูปแบบทั่วไปของ NZR ได้ถูกนำมาใช้และ receiving terminal สุ่มข้อมูลที่จุดกึ่งกลางของแต่ละบิท ในกรณีนี้การกระจายออกของพัลส์จะสามารถเป็นเพียงครึ่งหนึ่งของความยาวก่อนที่ความผิดพลาดจะเกิดขึ้น และอัตราข้อมูลจะต้องถูกตัดครึ่ง

## 1.5 การมอดดูเลท (Modulation)

ประโยชน์ของการมอดดูเลท

1. ทำให้สัญญาณมีกำลังสูงสามารถเดินทาง (propagate) ไปที่ไกลๆได้
2. ทำให้สัญญาณมีความถี่สูงขึ้นซึ่งเหมาะกับการรับสัญญาณมากขึ้น
3. สามารถแบ่งความถี่ให้ได้หลายๆสัญญาณส่งพร้อมกันภายใต้ตัวพาหะตัวเดียวกันได้ที่เรียกว่า multiplexing
4. สามารถมีความต้านทานการรบกวนหรือของสัญญาณรบกวน (interfering signal)

ปัจจุบันการมอดดูเลทที่ใช้ในการสื่อสารมีหลายระบบตามลักษณะการมอดดูเลทสัญญาณต่างๆแต่สามารถแบ่งการมอดดูเลทออกเป็นประเภทใหญ่ๆได้เป็น 2 ประเภท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. รูปแบบการมอดดูเลทแบบอนาล็อก (Analog modulation) ระบบนี้จะให้สัญญาณที่ถูกมอดดูเลทมีค่าต่อเนื่องแบบอนาล็อก เช่น AM , TM, PM เป็นต้น

2. รูปแบบการมอดดูเลทแบบดิจิตอล (Digital modulation) ระบบนี้จะให้สัญญาณที่ถูกมอดดูเลทมีค่าตัวเลขลงตัวแบบดิจิตอลเช่น PCM เป็นต้น

### 1.5.1 รูปแบบของการมอดดูเลทแบบอนาล็อก

โดยทั่วไปการมอดดูเลทของสัญญาณอนาล็อก (pre-modulation) จะมีเทคนิคอยู่ 3 แบบ

#### 1.5.1.1 การมอดดูเลททางความถี่ (Amplitude modulation :AM)

เป็นเทคนิคการมอดดูเลทสัญญาณเสียงเข้ากับสัญญาณพาหะ (carrier signal) ซึ่งเป็นสัญญาณรูปไซน์ที่มีความถี่สูงทำให้สัญญาณที่ผ่านการมอดดูเลทแล้วมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณพาหะตามแอมพลิจูดของสัญญาณเสียง แต่ความถี่ของสัญญาณพาหะยังคงที่จุดสำคัญของการมอดดูเลทชนิดนี้ที่ "แอมพลิจูดเปลี่ยนแปลงแต่ความถี่คงที่ "

#### 1.5.1.2 การมอดดูเลททางความถี่ (Frequency modulation :FM)

หลักการของการมอดดูเลททางความถี่นี้มีจุดสำคัญอยู่ที่ แอมพลิจูดของสัญญาณจะคงที่ แต่ความถี่ของสัญญาณพาหะจะเปลี่ยนแปลงไปตามแอมพลิจูดของสัญญาณที่นำเข้ามอดดูเลท (modulating signal) เมื่อพิจารณารูปสัญญาณพาหะและรูปสัญญาณข้อมูลที่นำเข้ามามอดดูเลท ในขณะที่แอมปลิจูดของสัญญาณอนาล็อกมีค่าเป็นบวก ความถี่ของสัญญาณที่ผ่านการมอดดูเลทจะสูงขึ้น แต่ในขณะที่แอมปลิจูดของสัญญาณอนาล็อกจะมีค่าเป็นลบ ความถี่ของสัญญาณที่ผ่านการมอดดูเลทจะมีค่าเป็นลบ

สำหรับเทคนิคของ FM สามารถแบ่งแยกได้อีกหลายวิธีเช่น เทคนิคของแนร์โรแบนด์เอฟเอ็ม(Narrow Band FM), ไวด์แบนด์ เอฟเอ็ม(Wide Band FM: WBFM) ฯลฯ

#### 1.5.1.3 การมอดดูเลททางเฟส (Phase modulation :PM)

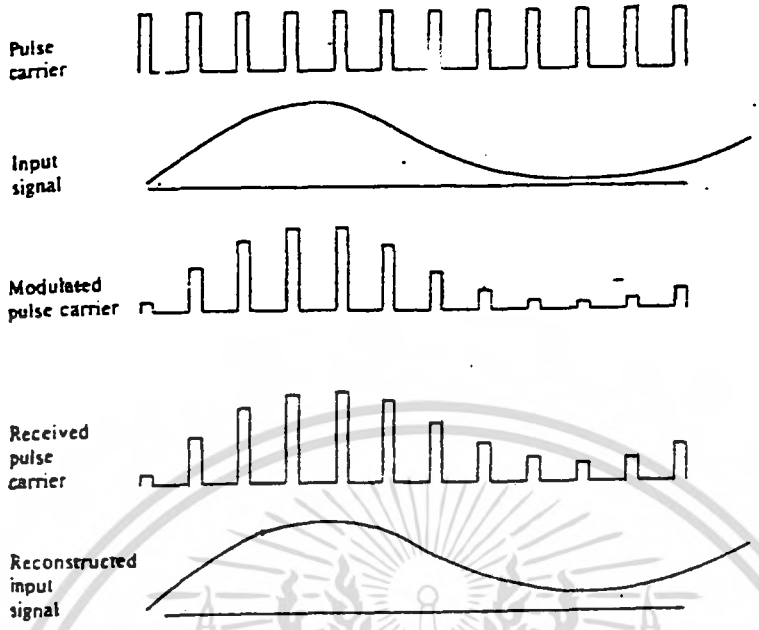
สัญญาณ PM และ FM จะมีความสัมพันธ์คล้ายคลึงกันมาก เพราะเป็นการมอดดูเลทร่วมกันเชิงมุม สัญญาณที่เกิดจากการมอดดูเลทจะให้เฟสของสัญญาณพาหะเปลี่ยนไปตามแอมพลิจูดของสัญญาณข้อมูล โดยจะมีแอมพลิจูดของสัญญาณพาหะคงที่เสมอ ซึ่งตามรูปคลื่นของ AM, FM และ PM จะเห็นได้ว่าขนาดของสัญญาณมีค่าคงที่เสมอส่วนความถี่และเฟสจะเปลี่ยนตามสัญญาณข้อมูล

### 1.5.2 รูปแบบการมอดดูเลทแบบดิจิตอล

#### 1.5.2.1 การมอดดูเลททางพัลส์แอมพลิจูด (PAM)

ลักษณะการทำงานของระบบ PAM แสดงดังรูป 1.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่1.7 แสดงการมอดดูเลทแบบ PAM**

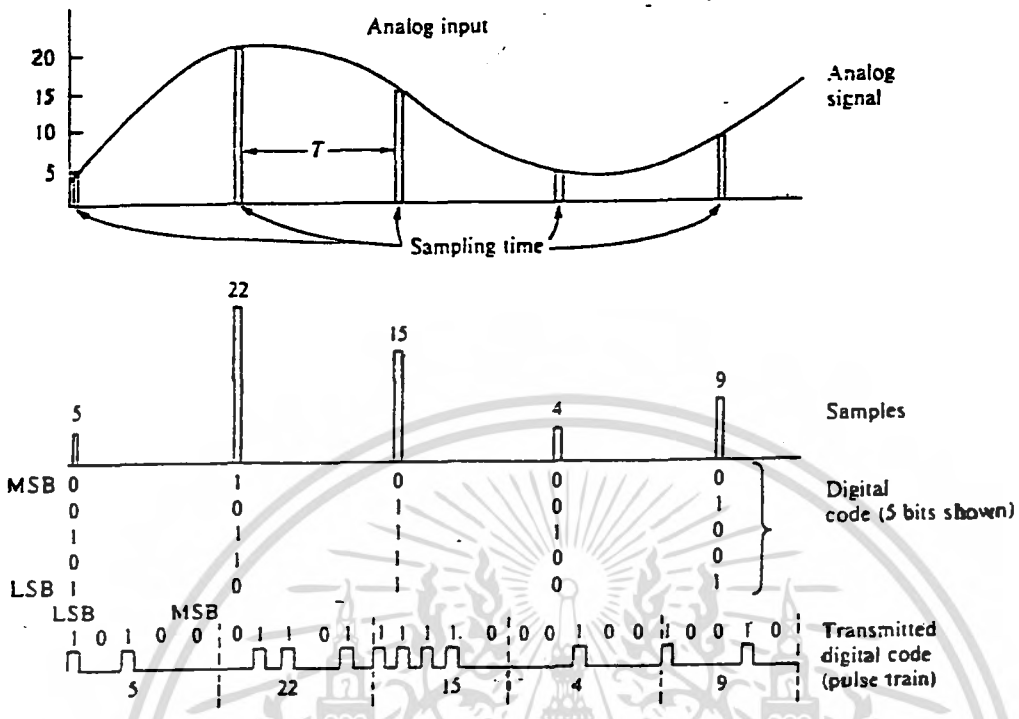
ซึ่งเป็นการมอดดูเลทโดยใช้ขนาดของสัญญาณที่เป็นสัญญาณอนาล็อก เป็นตัวกำหนดขนาดของสัญญาณพัลส์ ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมแหล่งกำเนิดที่เป็นคลื่นพาหะ สัญญาณพัลส์ที่มอดดูเลทแล้วจะทำหน้าที่ควบคุมแหล่งกำเนิดแสงให้ส่งสัญญาณที่เป็นพลังงานความเข้มแสงขึ้นกับแอมพลิจูดของพัลส์โดยตรง ขนาดของความถี่ของพัลส์ที่เป็นคลื่นพาหะต้องมีค่ามากกว่าความถี่ของสัญญาณอินพุทอย่างน้อย 2 เท่า ค่าความถี่ของคลื่นพาหะนี้เรียกว่า"อัตราการแซมปลิ้ง" (Sampling Rate) ในระบบทั่วไปอาจใช้อัตราการแซมปลิ้งมากกว่าความถี่สัญญาณอินพุทประมาณ 3-4 เท่า เช่นในระบบที่ต้องการส่งข้อมูลที่เป็นสัญญาณเสียง(โทรศัพท์) ซึ่งมีค่าแบนด์วิดธ์ของสัญญาณเสียงประมาณ 4 kHz อาจใช้สัญญาณพัลส์ที่เป็นคลื่นพาหะมีค่าความถี่ประมาณ 16 kHz เป็นตัวส่งข้อมูล

โดยปกติระบบการมอดดูเลทแบบ PAM ไม่ค่อยนิยมใช้กันมากนัก เว้นแต่ใช้ในระบบการสื่อสารระยะใกล้ทั้งนี้ก็เพราะว่ามีข้อเสียคือมีความไวต่อการเกิดสัญญาณรบกวนสูงมาก

**1.5.2.2 การมอดดูเลททางพัลส์โคด (PCM)**

เป็นเทคนิคการมอดดูเลทที่นิยมกันแพร่หลายในระบบสื่อสาร โดยเฉพาะระบบโทรศัพท์ทางไกล ลักษณะการทำงานของระบบ PCM แสดงดังรูป 1.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่1.8 แสดงการมอดดูเลทแบบ PCM**

ในตอนแรกสัญญาณอินพุทจะถูกสุ่มตัวอย่างหรือแซมปลิ้งด้วยอัตราการแซมปลิงเหมือนกับระบบ PAM จากนั้นขนาดของสัญญาณที่ถูกสุ่มออกมา (ซึ่งก็คือแอมพลิจูดของพัลส์ในระบบ PAM) จะถูกเข้ารหัสเป็นข้อมูลทางดิจิตอลด้วยระบบไบนารี่ ความละเอียดของสัญญาณขึ้นอยู่กับจำนวนบิทที่ใช้ในการเข้ารหัสข้อมูลดิจิตอลที่ถูกเข้ารหัสแล้วจะทำหน้าที่ควบคุมแหล่งกำเนิดแสงให้ส่งข้อมูลออกไปในลักษณะของสวิทช์ปิด-เปิด ดังนั้นในระบบนี้สัญญาณแสงที่เป็นข้อมูลจะไม่คำนึงถึงระดับความเข้มแสงเลย นอกจากการปิด-เปิดแสงในช่วงเวลาที่กำหนดในแต่ละบิทข้อมูลทำให้ลดการเกิดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบ PAM ลงได้มาก สัญญาณดิจิตอลที่รับได้ในภาครับจะถูกแปลงกลับสู่สัญญาณอนาล็อกอีกครั้งหนึ่ง ก่อนถูกส่งผ่านวงจรกรองความถี่เพื่อทำให้ได้สัญญาณที่มีลักษณะเดียวกับสัญญาณอินพุทก่อนนำไปขยายสัญญาณเพื่อนำไปใช้งานต่อไป

ประสิทธิภาพการส่งข้อมูลทางดิจิตอลสามารถกำหนดได้จากการส่งข้อมูลหรือบิทเรท (Bit Rate) ในลักษณะของจำนวนบิทต่อเวลา เช่น ระบบโทรศัพท์มีค่าแบนด์วิดธ์ของข้อมูล 4 kHz หากใช้อัตราการแซมปลิ้ง 4 เท่าคือใช้ค่าความถี่เท่ากับ 16 kHz และให้ข้อมูลแต่ละค่าที่เกิดจากการสุ่มตัวอย่าง ถูกแปลงเป็นเป็นเลขไบนารี่ชนิด 8 บิท จะทำให้ได้บิทเรทของระบบมีค่าเท่ากับ 128 kb/s เขียนได้ในสูตรการคำนวณได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บิทเรท = แบนวิดธ์ x อัตราการแซมปลิง x จำนวนบิทต่อข้อมูล

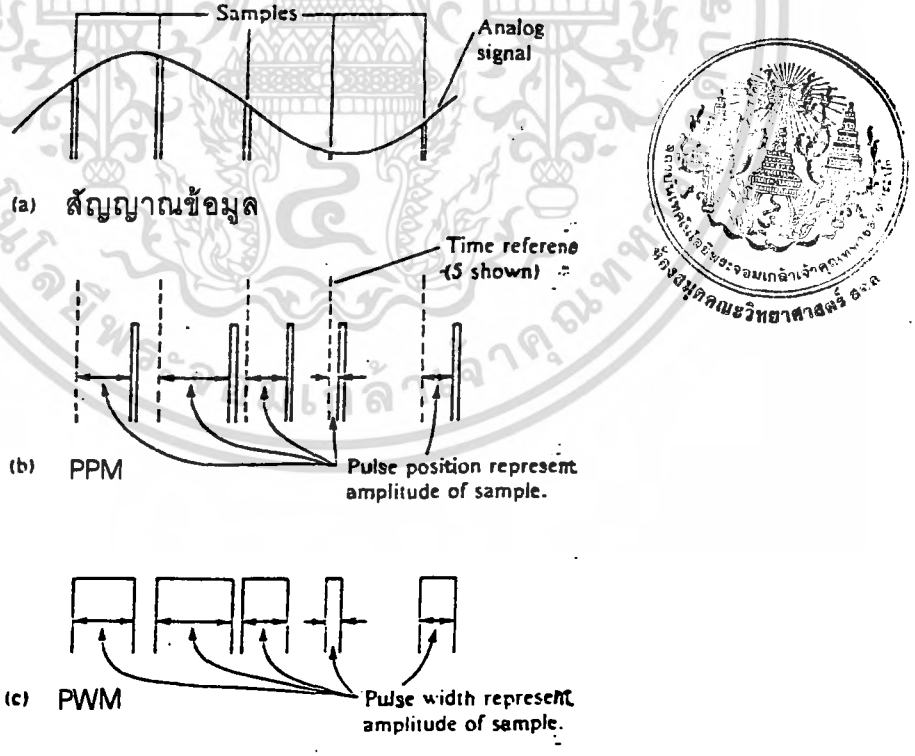
**1.5.2.3 การมอดดูเลททางพัลส์โพสิชัน (PPM)**

เป็นการมอดดูเลทโดยใช้ขนาดของสัญญาณที่ถูกสุ่มตัวอย่าง เป็นตัวกำหนดระยะเวลาในการส่งสัญญาณดังรูป ข้อมูลแสงที่ถูกส่งออกจะเป็นลักษณะของการปิด-เปิดรับแสง โดยมีช่วงเวลาเริ่มต้นของการเปิดแสง ที่เปลี่ยนไปจากจุดเวลาเริ่มต้นของการสุ่มตัวอย่าง เป็นตัวบอกขนาดของข้อมูล ดังนั้นอัตราการแซมปลิ้งในระบบ PPM จะต้องมีช่วงเวลาห่างของการสุ่มตัวอย่างมากพอที่จะไม่ทำให้ระยะเวลาของการส่งข้อมูลแสงเกิดการซ้อนทับกันได้

**1.5.2.4 การมอดดูเลททางพัลส์วิดธ์ (PWM)**

มีลักษณะการทำงานคล้ายกับระบบ PPM เพียงแต่สัญญาณที่เป็นข้อมูลแสงจะเริ่มต้นทำงานที่ตำแหน่งเวลาของการเริ่มต้นสุ่มตัวอย่าง โดยช่วงเวลาการเปิดแสงหรือขนาดความกว้างของพัลส์จะเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมกับขนาดของข้อมูลที่ถูกสุ่มตัวอย่าง

ในระบบ PWM และ PPM ต้องมีระยะเวลาของเปิดแสงเพื่อส่งข้อมูลที่มีความแน่นอนสูงมิฉะนั้นข้อมูลที่ได้รับอาจเกิดความผิดผลาดขึ้น ในขณะเดียวกันระบบการส่งสัญญาณแสงในช่วงระยะทางหนึ่งมีผลทำให้สัญญาณข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลงในเรื่องของขนาดความกว้างสัญญาณจึงทำให้ระบบนี้ไม่ค่อยนิยม




**รูปที่ 1.8 แสดงเทคนิค PPM,PWM**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ข้อพิจารณาในการออกแบบระบบพื้นฐาน

การออกแบบระบบพื้นฐานจะเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ power budget และการวิเคราะห์แบนด์วิดธ์ ในส่วนของ power budget ต้องคำนวณการสูญเสียทั้งหมดของระบบเพื่อให้แน่ใจว่าตัวรับสัญญาณได้รับพลังงานเพียงพอจากแหล่งกำเนิดของระบบที่จำเป็น การวิเคราะห์เวลาช่วงขาขึ้น (rise time) ทำให้แน่ใจว่าการเชื่อมต่อนั้นมีแบนด์วิดธ์ที่จำเป็นต่อการใช้งาน

### 1.6.1 การสูญเสียของระบบ (system loss)

การสูญเสียของระบบทั้งสิ้นเป็นผลรวมของการสูญเสียแต่ละส่วน การเชื่อมต่อจะต้องส่งพลังงานออกมาอย่างเพียงพอที่จะทำให้ตัวรับสัญญาณทำงานได้ภายใต้ในระบบใหญ่ การสูญเสียการเชื่อมต่อของระบบคือ

1. การต่อเส้นใยนำแสงเข้ากับอุปกรณ์ประเภท active เช่น
   - การเข้าคู่ NA ที่ไม่ได้ขนาดกัน
   - การเข้าคู่เส้นผ่าศูนย์กลางที่ไม่ได้ขนาดกัน
   - การวางแนว (alignment) ข้อต่อและอุปกรณ์ที่ไม่ถูกต้อง
2. การลดทอนสัญญาณของเส้นใยนำแสง
3. การต่อเส้นใยนำแสงเข้ากับเส้นใยนำแสง เช่น
   - การเข้าคู่ NA ที่ไม่ได้ขนาดกัน
   - การเข้าคู่เส้นผ่าศูนย์กลาง core ที่ไม่ได้ขนาดกัน
   - การสูญเสียภายในข้อต่อของตัวเชื่อมต่อ
4. ส่วนประกอบที่เป็น passive (สวิทช์ , couplers ฯลฯ )
   - การเข้าคู่ NA และเส้นผ่าศูนย์กลางที่ไม่ได้ขนาดกัน
   - การสูญเสียภายในข้อต่อ
   - Imbeded connector loss

โดยปกติแล้วการสูญเสียต่อหน่วยจะมีค่า 1-3 dB สำหรับแหล่งกำเนิดที่มีสภาพเก่าส่วนอัตราการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิจะขึ้นอยู่กับการลดทอนสัญญาณของเคเบิ้ลที่ระบุไว้ การเข้าคู่ที่ไม่ตรงกันก็เป็นสาเหตุให้สูญเสียเมื่อคัปเปิ้ลแสงจากเส้นใยนำแสงหนึ่งไปยังอีกเส้นหนึ่งด้วยการสูญเสีย

การสูญเสียจากข้อต่อ (insertion loss) เป็นการสูญเสียที่เกิดจากชิ้นอุปกรณ์ประเภท passive เช่น connector, coupler หรือ สวิทช์ แฟกเตอร์ที่เกี่ยวกับการสูญเสียจากข้อต่อจะขึ้นอยู่กับความยาวของเส้นใยนำแสงตลอดทางที่ลำแสงผ่านในเส้นใยนำแสงและพลังงานคัปเบิ้ลระหว่างโหมดจนถึงการกระจายโหมดสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



### 1.6.2 การวิเคราะห์แบนด์วิดธ์

แม้ว่าการเชื่อมต่อ (link) จะใช้พลังงานที่เพียงพอแก่ตัวรับสัญญาณแต่อาจจะไม่พอกับความต้องการแบนด์วิดธ์ของการใช้งาน ปกติตัวรับจะมีชิ้นส่วนที่จำกัดแบนด์วิดธ์ในการเชื่อมต่อเส้นใยนำแสง bandwidth budget นี้จะเป็นเทคนิคสำคัญในการกำหนดผลของตัวส่งและชิ้นส่วนประกอบอื่นๆ บนการเชื่อมต่ออัตราเร็วข้อมูล

โดยทั่วไปแล้วเทอมของแบนด์วิดธ์จะอยู่ในรูปของความถี่ ความสามารถในการนำพาข้อมูลของการเชื่อมต่อกำหนดในรูปฟังก์ชันของเวลา ส่วนเวลาในการเปลี่ยนของสัญญาณจะใช้ risetime และ falltime เป็นตัวอ้างอิง

ถ้าอัตราข้อมูล NRZ สูงสุดในตัวรับ(reciever) กำหนดให้เป็น B และ bit time , T สัมพันธ์กับอัตราข้อมูลจะได้

$$T = \frac{1}{B} \qquad (1.4)$$

trasition time เป็นเลขของสัญญาณทางแสงที่เข้ามายังตัวรับ (reciever) , $t_s$ ควรมีค่าน้อยกว่า 70% ของสัญญาณ bit time นั่นคือ

$$t_s = 0.7T = \frac{0.7}{T} \qquad (1.5)$$

ยิ่งนานเท่าไร $t_s$ ก็มีค่าสั้นกว่าค่าดังกล่าว แบนด์วิดธ์ของระบบทั้งหมดจะถูกจำกัดด้วยความสามารถของตัวรับ ถ้า $t_s$ มีค่ายาวกว่าค่านี้ สมรรถนะการเชื่อมต่อจะเริ่มถูกจำกัดโดยอุปกรณ์อื่นมากกว่าจะเป็นตัวรับ

## 1.7 สรุป

ในช่วงแรกของบทนี้กล่าวถึงโครงสร้างของเส้นใยนำแสงที่ประกอบด้วยส่วนที่เรียกว่า core และ cladding เป็นหลัก และสามารถแบ่งเส้นใยนำแสงออกเป็น 3 ชนิดคือ Step-Index multimode fiber , Gradded-Index fiber และ singlemode fiber แต่ละชนิดจะมีรังสีการเดินทางที่แตกต่าง

ระบบการติดต่อสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงจะประกอบด้วยส่วนหลัก ๆ 3 ส่วนคือ

- เครื่องส่ง
- เครื่องรับ
- ระบบการเชื่อมต่อ

ส่วนของเครื่องส่งจะทำหน้าที่แปลงสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแสงจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง วงจรขับและการมอดดูเลท ส่วนภาครับจะทำหน้าที่แปลงสัญญาณทางแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าจะประกอบด้วย โฟโต้ไดโอด พินโฟโต้ไดโอด อะวาลานซ์โฟโต้ไดโอดและส่วนของการเชื่อมต่อคือการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องรับกับเครื่องส่งซึ่งก็คือเส้นใยนำแสง

การมอดดูเลทแบ่งออกเป็น 2 ระบบคือ การมอดดูเลทในระบบอนาล็อกและการมอดดูเลทในระบบดิจิตอล ระบบอนาล็อกแบ่งเป็น AM, FM, PM และในระบบดิจิตอลการมอดดูเลทนั้นจะแบ่งเป็น PAM, PCM, PPM, PWM โดยที่ระบบ PCM เป็นที่นิยมโดยเฉพาะในระบบโทรศัพท์ทางไกล ในการออกแบบระบบการติดต่อสื่อสารจะต้องคำนึงถึงการสูญเสียของระบบและค่าแบนด์วิดธ์ที่พอเหมาะกับอุปกรณ์ด้วย




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 2
# ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับโซลิตอน

## 2.1 บทนำ

ในระบบที่เป็นเชิงเส้นนั้น เอาท์พุทเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอินพุทและคำตอบของอินพุทคือผลบวกของแต่ละคำตอบ แต่ในทางตรงกันข้าม เมื่อระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้น จะทำให้เกิดผลที่เพิ่มขึ้นกับผลลัพธ์ของคำตอบ ยกตัวอย่างเช่น เมื่อลำโพงถูกขับมากเกินไป การเคลื่อนที่ของสัญญาณในเส้นใยนำแสงจะไม่เป็นไปตามทิศทางที่เหมาะสมสัญญาณเสียงที่ได้จะเพี้ยนไป เช่นเดียวกันโซลิตอนซึ่งเป็นคลื่นที่มีเสถียรภาพ สามารถอธิบายได้เหมือนพัลส์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่แพร่ไปโดยแทบจะไม่มีการกระจายในระยะทางไกล คำตอบที่สมบูรณ์ของโซลิตอนเนื่องมาจากการกลับสู่สภาพเดิมของความไม่เป็นเชิงเส้นที่สมดุลกับการกระจายของแสง แม้ว่าตัวกลางจะเป็นแบบไม่เชิงเส้นภายใต้สภาวะที่แน่นอน โซลิตอนไม่เพียงแพร่ไปโดยปราศจากการผิดเพี้ยน แต่ยังคงรักษาคุณลักษณะเดิมอยู่ได้ภายหลังจากการชนกันแบบยืดหยุ่น จากปรากฏการณ์ที่แตกต่างกันทางฟิสิกส์ ทำให้เกิดโซลิตอนชนิดต่างๆ ขึ้นหลาย ๆ ลักษณะ ตัวอย่างเช่น โซลิตอนของคลื่นน้ำ,โซลิตอนของคลื่นอิออน-พลาสมา (ion-plasmasoliton), แมกนิโตไฮโดรไดนามิคโซลิตอน (magnetohydrodynamic soliton), โซลิตอนของโพลารอนโมเลกุลคู่ (bimolecular polaron soliton), โซลิตอนของการกระตุ้นด้วยความเข้มสูง (high-intensity shock soliton), สภาวะการเคลื่อนที่ของกระแสประสาทของโซลิตอน (nerve-conduction soliton) และโซลิตอนของแสงแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear soliton)

โซลิตอนที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติมีบางเหตุการณ์ที่น่าสนใจคือปรากฏการณ์จุดแดงใหญ่ (Great Red Spot) บนดาวพฤหัส ซึ่งมีคุณลักษณะเด่นของโซลิตอนที่เกิดจากการหมุนวนในจุดศูนย์กลางหรือพายุในชั้นบรรยากาศของดาวพฤหัส โดยลักษณะเด่นที่กล่าวมานี้คือ

1). การคงรูปร่าง (ไม่มีการกระจาย) โดยได้มีการสังเกตจากโลกเป็นเวลานับพันปี

2). ไม่มีอันตรกิริยาต่อกันกับโซลิตอนอื่น

## 2.2 ความเป็นมาของโซลิตอน

**1834** J.Scott Russell เป็นบุคคลแรกที่ได้สังเกตลักษณะของโซลิตอนจากปรากฏการณ์ธรรมชาติ ในขณะที่เขาขี่ม้าไปตามคลองยูเนี่ยน ได้สังเกตเห็นว่าเมื่อเรือในคลองหยุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทันทีทันใด จะมีคลื่นน้ำขนาดใหญ่เคลื่อนที่ไปตามลำคลองด้วยระยะทางหลายไมล์ โดยที่รูปร่างคงเดิมและความเร็วคงที่ จึงเรียกคลื่นชนิดนี้ว่าคลื่นโซลิทารี่ (solitary wave)

**1895** เพื่ออธิบายลักษณะดังกล่าว D.J. Kortweg & G.DevriesfVries นักคณิตศาสตร์ชาวดัชท์ ได้อธิบายคลื่นน้ำจากการสังเกตของ Russell ด้วยคำตอบของสมการ Kdvโดยที่สมการ Kdv นี้เป็นสมการพาร์เทียลดิฟเฟอเรนเชียลแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear partial differential equation )

**1965** Zabudly & Kruskal ได้ค้นพบว่า เมื่อมีคลื่นโซลิทารี่ ของ Korteweg-DeVries มากกว่า 2 คลื่นมาชนกันจะไม่เกิดการกระจายและไม่ถูกทำลายไป จึงได้ใช้เทอมของ โซลิตอน เป็นครั้งแรก เพื่ออ้างถึงอนุภาคที่เหมือนกับคลื่นโซลิทารี่เหล่านี้

**1971** Zhakharev, V.E. & Shabat,A.B. ได้แก้สมการโซร์ดิงเจอร์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Schrodinger (NLS)) เพื่อใช้อธิบายโซลิตอนด้วยสมการการกระเจิงกลับ(inverse scattering) และได้แสดงว่าคำตอบของสมการ NLS นั้นคือ โซลิตอน

**1973** Hasegawa,A. & Tappat,F. ได้นำคำตอบจากสมการ NLS ไปประยุกต์ใช้กับการเคลื่อนที่ของแสงในเส้นใยนำแสง ด้วยการเสนอว่า พัลส์ของแสงในเส้นใยนำแสงจัดรูปเป็นเอนเวลลอปโซลิตอน (envelope soliton) อาจจะมีประโยชน์ต่อการสื่อสารระยะทางไกล

**1980** Mollenauer และคณะ ได้ทดลองและแสดงให้เห็น ถึงการประยุกต์ใช้โซลิตอนส่งผ่านไปในเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว ซึ่งพบว่าการเลือกความเข้มแสงเริ่มต้นให้ถูกต้องมีผลต่อการจำกัดของการกระจายออกของคลื่นในเส้นใยนำแสง

นับแต่นั้นมาการค้นคว้าและวิจัยในโซลิตอนของแสง ทั้งในทางทฤษฎีและทางปฏิบัติได้เป็นไปอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน รวมถึงการพิจารณาอย่างจริงจังต่อการนำโซลิตอนไปใช้ในงานด้านการสื่อสารระยะทางไกล และเมื่อไม่นานมานี้ มีการใช้โซลิตอนอย่างแพร่หลายสำหรับการทดลองในอุปกรณ์สวิทชิ่งความเร็วสูง เพื่อให้ได้มาซึ่งอุปกรณ์โฟโตนิกส์ต่าง ๆ ที่ต้องการความเร็วสูงในการส่งข้อมูลต่อไปในอนาคต

## 2.3 หลักการของโซลิตอน

โซลิตอนของแสงจัดรูปขึ้นเมื่อพัลส์ของแสงที่มีความเข้มสูงเดินทางเข้าไปในเส้นใยนำแสง แล้วเกิดปฏิกิริยาระหว่างการกระจาย (dispersion) และความไม่เป็นเชิงเส้นของตัวกลาง (nonlinearity)ซึ่งเป็นคุณสมบัติของเส้นใยนำแสงเอง ซึ่งจากปฏิกิริยาทั้ง 2 นี้จะทำให้เกิดการอัดและขยายสัญญาณที่สมดุลกันมีผลให้โซลิตอนเคลื่อนที่ได้โดยปราศจากความผิดเพี้ยน ซึ่งอธิบายดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.3.1 ลักษณะการกระจายของคลื่น *(dispersion)***

เกิดขึ้นจากความจริงที่ว่า ความถี่ของคลื่นขึ้นกับความเร็วที่เคลื่อนที่ไป ดังนั้น ความยาวคลื่นแสงที่แตกต่างกัน จะให้คลื่นที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่างกัน ทำให้เกิดการกระจาย อยู่ 2 ลักษณะด้วยกัน คือ

*1). การกระจายความเร็วกลุ่มแบบปกติ (positive group velocity dispersion)*

ลักษณะนี้เกิดขึ้นกับแสงขาว โดยแสงสีแดงจะเดินทางได้เร็วกว่าแสงสีน้ำเงิน นั่นคือ คลื่นที่มีความยาวคลื่นยาว จะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าคลื่นที่มีความยาวคลื่นสั้น ในกรณีนี้เป็นลักษณะการกระจายของความเร็วกลุ่มแบบปกติ (normal GVD)

*2). การกระจายความเร็วกลุ่มแบบไม่ปกติ (negative group velocity dispersion)*

ลักษณะนี้เกิดขึ้นกับรังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 1.3 $\mu$m ขึ้นไป ในกรณีนี้ลักษณะของการกระจายจะเปลี่ยนไป โดยคลื่นที่มีความยาวคลื่นสั้นจะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าคลื่นที่มีความยาวคลื่นยาว ซึ่งลักษณะนี้เป็นการกระจายของความเร็วกลุ่มแบบไม่ปกติ (anormalous GVD)

พบว่าจากการกระจายความเร็วกลุ่มแบบไม่ปกติ (negative GVD) มีผลให้องค์ประกอบแสงที่ความยาวคลื่นยาว มีแนวโน้มเคลื่อนที่ตามหลัง ทำให้เกิดเชิร์พ (chirp) ที่เป็นความแตกต่างระหว่างความถี่ของพัลส์ที่ leading edge กับ trailing edge ขึ้น

ในการเกิดของโซลิตอนจากการกระจายแบบไม่ปกติ ที่สอดคล้องกับความยาวคลื่นมากกว่า 1.3 $\mu$m ขึ้นไป ทำให้การสูญเสียในเส้นใยนำแสงเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นสั้นลงเป็นไปตามหลักการกระเจิงของเรย์เล่ห์ (Rayleigh scattering) และการสูญเสียจะเพิ่มขึ้นด้วยเมื่อความยาวคลื่นยาวขึ้น ตามหลักของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด แต่สำหรับโซลิตอนแล้วไม่มีการสูญเสียเช่นนั้นเกิดขึ้นเนื่องจาก ความยาวคลื่นของโซลิตอนสอดคล้องกับความยาวคลื่นมีการสูญเสียต่ำที่สุดที่ความยาวคลื่น 1.5 $\mu$m

จากที่ทราบว่าคลื่นที่มีความยาวคลื่นที่ต่างกันจะเดินทางด้วยความเร็วต่างกัน ดังนั้นหากว่าคลื่นแสงมีเพียงปรากฏการณ์การกระจายเพียงอย่างเดียวจะทำให้เกิดการขยายออกของพัลส์เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น และทำให้เกิดการจำกัดบิทเรท (bit rate) สูงสุดที่เป็นไปได้ ด้วยเหตุนี้ จึงต้องประกอบด้วยปรากฏการณ์ของความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearity) อีกชนิดหนึ่งที่จะทำการชดเชยการกระจายออกของพัลส์เพื่อให้ได้มาซึ่งโซลิตอนที่สมบูรณ์

**2.3.2 ลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นของตัวกลาง *(nonlinearity)***

เกิดขึ้นจากการที่ แอมพลิจูดหรือความเข้มแสงขึ้นกับความเร็วที่เคลื่อนที่ไป โดยจอห์นเคอร์ (John Kerr) ได้พบว่า ผลดังกล่าวเป็นลักษณะไม่เชิงเส้นของตัวกลางที่รู้จักในนาม Kerr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

nonlinearity หรือ Kerr optical effect นั่นคือการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหของแสง $(n = c/v)$ มีความสัมพันธ์กับความเข้มแสง ดังสมการ

$$n = n_0 + n_2 I \qquad (2.1)$$

โดยที่ $n_0$ เป็นดัชนีหักเหเชิงเส้น , $n_2$ เป็นสัมประสิทธิ์ของเคอร์ (Kerr coefficient) ซึ่งในกรณีของซิลิกามีค่า = $3.2\times10^{-16}$ $cm^2/W$และ $I$ เป็นความเข้มแสง

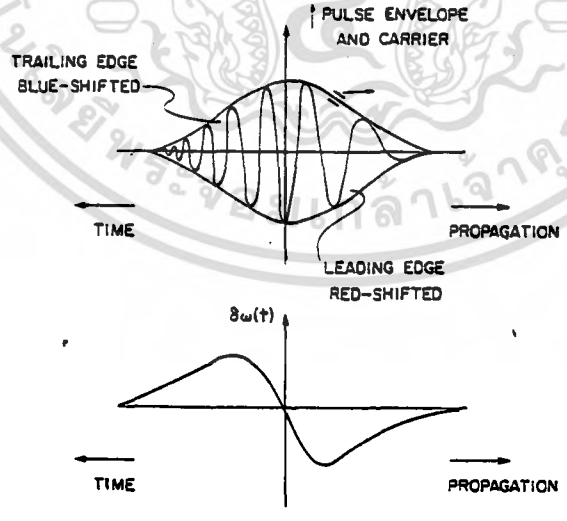
จากสมการทราบว่าค่าดัชนีหักเหขึ้นอยู่กับค่าความเข้มแสง ซึ่งเป็นผลมาจากการเลื่อนของเฟส (phase shift) ดังนั้นถ้าพิจารณาคลื่นที่มีแอมพลิจูดคงที่ตลอดเส้นใยนำแสง $L$ พบว่าจะมีการเลื่อนของเฟส เป็น

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} L n_2 I \qquad (2.2)$$

และเมื่อทำการดิฟเฟอเรนเชียลสมการ 2.2 เทียบกับเวลาจะได้ความถี่เป็น

$$\delta\omega = -\frac{\partial\Delta\phi}{\partial t} = -\frac{2\pi}{\lambda} L n_2 \frac{\partial I}{\partial t} \qquad (2.3)$$

จากสมการ 2.2 พิจารณากรณีที่เฟสมีแอมพลิจูดเล็กมาก ๆ และ $n_2$ มีค่าน้อย ๆ ดังนั้นการเลื่อนของเฟสจะมีค่าน้อยมาก ๆ ซึ่งเกิดขึ้นที่ด้านหน้าและด้านหลังของสัญญาณการหน่วงเฟส (phase delay)และกรณีที่มีแอมพลิจูดสูงสุดก็จะให้สัญญาณเฟสถูกหน่วง(delay) ที่มีค่ามากที่สุด (แต่เป็นค่าลบ) ดังรูปที่ 2.1 (a)และ (b) โดยในทางคณิตศาสตร์แล้ว ความถี่เป็นอนุพันธ์ของเฟสกับเวลาตามสมการ 2.3 ซึ่งถ้าพิจารณาถึงความถี่สัมพัทธ์กับความถี่ของคลื่นพาหะ จะได้กราฟดังรูปที่ 2.1




**รูปที่ 2.1 แสดงเชิร์พความถี่เนื่องจาก self-phase modulation**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าในแต่ละส่วนของพัลส์จะให้การเลื่อนของเฟสแตกต่างกันออกไป เนื่องมาจากผลของค่า $\Delta\phi$ ตามสมการ 2.2 เมื่อ $I$ แปรตามแอมพลิจูดของพัลส์ ซึ่งลักษณะของการเลื่อนของเฟสเหล่านี้เทียบได้กับรูปร่างที่แน่นอนของพัลส์ ด้วยเหตุนี้ในกรณีการเลื่อนของเฟสส่วนที่เป็น leading edge ของพัลส์มี $\partial I/\partial t$ เป็นบวก จึงทำให้ $\partial\Delta\phi/\partial t$ เป็นบวกด้วย แต่ในกรณีการเลื่อนไปของความถี่ leading edge จะเป็นลบซึ่งตรงกันข้ามกับ trailing edge ของพัลส์ที่เป็นบวก ผลคือทำให้เฟสข้างหลังเพิ่มขึ้น จากเหตุนี้ความไม่เชิงเส้นในเส้นใยนำแสง จึงเกิดจากความถี่ที่สูงขึ้นใน trailing edge ของพัลส์ ซึ่งเชิร์พที่ได้จะมีลักษณะแตกต่างกับเชิร์พที่เกิดจากการกระจาย

พิจารณาว่าทำไมปรากฏการณ์เคอร์แบบไม่เป็นเชิงเส้นที่รวมกับการกระจายความเร็วกลุ่มแบบไม่ปกติ จึงเกิดเป็นโซลิตอนในเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวขึ้นที่ความถี่ของความเร็วกลุ่มค่าหนึ่ง กล่าวคือเมื่อให้สัญญาณแสงที่เป็นแสงสีเดียว (monochromatic) ผ่านเข้าไปในเส้นใยนำแสง แสงที่มีความเข้มมากพอจะไปกระตุ้นสเปกตรัมของความถี่แสงต่าง ๆ ที่มีความเร็วกลุ่มต่างกันเพียงเล็กน้อย ทำให้ผลของปรากฏการณ์เคอร์แบบไม่เป็นเชิงเส้นเปลี่ยนไปขึ้นกับดัชนีหักเหที่เปลี่ยนไป ซึ่งมีผลให้การเลื่อนของเฟสเปลี่ยนไปที่เรียกว่า self-phase modulation (SPM) ดังนั้น SPM จะนำหน้าความยาวคลื่นยาว ขณะที่การกระจายความเร็วกลุ่มแบบไม่ปกติจะหน่วงความยาวคลื่นยาว และคุณสมบัติของความเข้มแสงและรูปแบบของแสงนั้นเป็นปฏิกิริยาที่หักล้างซึ่งกันและกัน ซึ่งถ้าความเข้มแสงที่มีปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดตามที่กล่าวมามีค่าเท่ากันอย่างแน่นอนและสอดคล้องกับโซลิตอนพื้นฐานที่ N=1 จะให้พัลส์ที่เดินทางไปได้โดยไม่เปลี่ยนรูป

## 2.4 สรุป

ในบทนี้จะกล่าวถึงประวัติความเป็นมาของโซลิตอนโดยผู้ค้นพบลักษณะของโซลิตอนเป็นคนแรกคือ J. Scott Russel จึงได้มีการศึกษาคุณสมบัติของโซลิตอนกันต่อ ๆ มาจนกระทั่งในปัจจุบันได้มีการศึกษาประยุกต์ใช้โซลิตอนเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในด้านการสื่อสารระยะทางไกลต่อไป

จากการศึกษาคุณสมบัติของโซลิตอนเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาของ 2 ปรากฏการณ์ คือ

1. คุณสมบัติการกระจายของคลื่นด้วยความเร็วกลุ่มแบบไม่ปกติ โดยให้คลื่นที่มีความยาวคลื่นสั้นเดินทางได้เร็วกว่าคลื่นที่มีความยาวคลื่นยาว

2. คุณสมบัติของความไม่เป็นเชิงเส้นของตัวกลาง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่มาขดเขยการกระจายคลื่น มีผลทำให้เกิดการเลื่อนเฟสเปลี่ยนไปเกิด Self-phase Modulation ขึ้น ซึ่งลักษณะทั้ง 2 นี้จะเกิดขึ้นในทิศตรงกันข้าม ทำให้เกิดการขดเขยที่สมดุลกัน สัญญาณโซลิตอนจึงสามารถคงรูปร่างอยู่ได้ตลอดระยะทางในการส่งสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3
# สมการโชร์ดิงเจอร์แบบไม่เชิงเส้น
# (The Nonlinear Schrodinger Equation)

## 3.1 บทนำ

ในการใช้เส้นใยนำแสงทำเป็นท่อนำคลื่นหรือตัวกลางในการส่งสัญญาณ พบว่าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญ 2 ชนิดที่มีต่อตัวกลางไดอิเลกตริกคือ

1) การเปลี่ยนแปลงบนการกระจายของความเร็วกลุ่ม $k''$ ซึ่งกำหนดได้ด้วยลักษณะของการกระจายในเนื้อสารจากดัชนีหักเห $n_0(\omega)$ ของวัสดุที่นำมาทำเส้นใยนำแสง รวมไปถึงกำหนดได้ด้วยลักษณะการกระจายของท่อนำคลื่นซึ่งขึ้นกับโครงสร้างของโหมดที่ส่งเข้าไปในเส้นใยนำแสง

2) การลดลงของสัมประสิทธิ์ไม่เชิงเส้น เนื่องจากการเปลี่ยนความเข้มในภาคตัดขวางของสนามไดอิเลกตริกของเส้นใยนำแสง

## 3.2 สมการคลื่นของเอนเวลลอปฟังก์ชัน

พิจารณาคลื่นเอนเวลลอปในอวกาศโดยกำหนดให้เลขคลื่น $k$ $(=n\omega/c)$ และความถี่พาหะ $\omega_1$ และจากความจริงที่ว่าดัชนีหักเห $n$ เป็นฟังก์ชันของความถี่ $\omega$ ดังนั้น

$$k-k_1=\left.\frac{\partial k}{\partial\omega}\right|_{\omega_1}(\omega-\omega_1)+\left.\frac{1}{2}\frac{\partial^2 k}{\partial\omega^2}\right|_{\omega_1}(\omega-\omega^2)+\left.\frac{1}{6}\frac{\partial^3 k}{\partial\omega^3}\right|_{\omega_1}(\omega-\omega^3)+\ldots \qquad (3.1)$$

สมการ 3.1 นี้ ได้อธิบายเลขคลื่นในรูปของความถี่ของคลื่นที่ถูกมอดดูเลทที่มีการเบี่ยงเบนความถี่ไปจากความถี่พาหะ $\omega_1$ เพียงเล็กน้อย

จากที่ฟังก์ชันคลื่นเอนเวลลอป $E(z,t)$ เป็นฟังก์ชันที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ กับระยะทาง $z$ และเวลา $t$ ดังนั้นจึงทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปฟูเรียร์ ซึ่งแสดงได้ด้วยการใช้รูปตัวแปรของฟูเรียร์ในอวกาศของ $\Delta\omega$ $(=\omega-\omega_1)$ แสดงการเลื่อนความถี่ของ side band ออกไปจากความถี่พาหะเพียงเล็กน้อยและ $\Delta k$ $(=k-k_1)$ แสดงการเลื่อนของเลขคลื่น และจาก $\Delta\omega$ และ $\Delta k$ นี้สามารถนำไปเขียนใหม่ในรูป $i\dfrac{\partial}{\partial t}$ และ $-i\dfrac{\partial}{\partial z}$ ตามลำดับ และแทนลงในสมการ 3.1 ได้เป็น

$$-i\frac{\partial}{\partial z}=ik'\frac{\partial}{\partial t}-\frac{1}{2}k''\frac{\partial^2}{\partial t^2}-\frac{i}{6}k'''\frac{\partial^3}{\partial t^3}+\ldots \qquad (3.2)$$

ถ้าแสดงสมการ 3.2 บนฟังก์ชันเอนเวลลอป $A(z,t)$ ของสนามไฟฟ้า

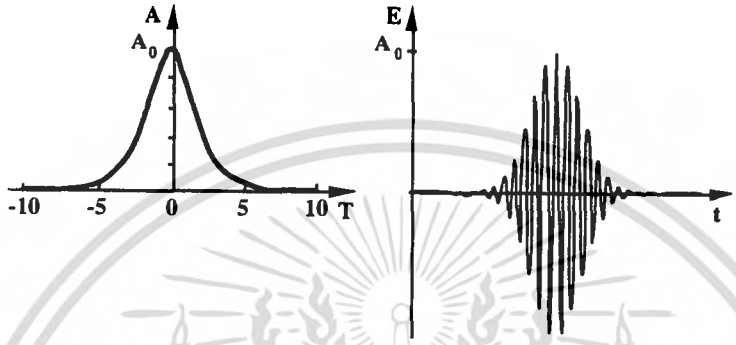
$$E(z,t)=A(z,t)\exp\left[i\left(k_0z-\omega_0t\right)\right] \qquad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าแอมพลิจูด $A(z,t)$ ในเส้นใยนำแสงได้แก้สมการคลื่นแบบไม่เชิงเส้นให้อยู่ในรูป

$$i\frac{\partial A}{\partial z}+ik'\frac{\partial A}{\partial t}-\frac{1}{2}k''\frac{\partial^2 A}{\partial t^2}=0 \qquad (3.4)$$

เมื่อ $$k''=\left.\frac{\partial k}{\partial \omega}\right|_{\omega_1}, \quad k''=\left.\frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2}\right|_{\omega_1} \qquad (3.5)$$




**รูปที่ 3.1 แสดงฟังก์ชันเอนเวลลอป $A(z,t)$ และสนามไฟฟ้า $E(z,t)$**

ความเร็วกลุ่ม $v_g$ ของคลื่นที่ถูกมอดดูเลทหาได้จาก

$$\frac{ck}{\omega}=n \qquad (3.6)$$

โดย $$v_g=\frac{\partial \omega}{\partial k}$$

ดังนั้น $$k'=\frac{\partial k}{\partial \omega}=\frac{1}{v_g} \qquad (3.7)$$

และ $$k''=\frac{\partial}{\partial \omega}\left(\frac{1}{v_g}\right)=-\frac{1}{v_g^2}\frac{\partial v_g}{\partial \omega} \qquad (3.8)$$

โดยค่า $k''$ ได้แสดงถึงคุณสมบัติในการกระจายความเร็วของคลื่นที่เกิดขึ้นจากการไม่เปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหต่อความถี่ ดังนั้นค่าของ $k''$ จึงขึ้นกับลักษณะในการกระจายของความเร็วกลุ่มของคลื่น

เมื่อพิจารณาว่าพัลส์ของแสงที่ส่งผ่านเข้าไปในเส้นใยนำแสงมีขนาดสั้น และให้ $\frac{\partial^2 A}{\partial t^2}$ มีค่ามากขึ้นตามส่วนกลับของความกว้างพัลส์ยกกำลังสอง และให้รูปร่างของพัลส์ผิดเพี้ยนไปในระหว่างการส่งสัญญาณ ซึ่งมาจากกรณีที่เส้นใยนำแสงมีขนาดของภาคตัดขวางกว้างพอกับความยาวคลื่นแสง ดังนั้นการกระจายของความเร็วกลุ่ม $k''$ จึงกำหนดด้วยคุณสมบัติของการกระจายภายในเนื้อสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

* $k''$ = 0 ที่ความยาวคลื่นในการกระจายประมาณ 1.3 $\mu$m

* $k''$< 0 เกิดขึ้นกับความยาวคลื่นที่สูงกว่า 1.3 $\mu$m ขึ้นไป และในช่วงนี้จะให้ความยาวคลื่นที่ให้การสูญเสียมีค่าต่ำสุด คือ $\lambda$ = 1.55$\mu$m ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของโซลิตอนที่ให้การกระจายของความเร็วกลุ่มเป็นแบบไม่ปกติ

* $k''$> 0 เกิดขึ้นกับความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 1.3 $\mu$m ลงไป ซึ่งความยาวคลื่นช่วงนี้ไม่เหมาะกับระบบของการสื่อสาร

ในทางเทคนิคแล้ว คุณสมบัติในการกระจายความเร็วกลุ่ม $k''$ ของเส้นใยนำแสงได้แสดงได้ในเทอมของพารามิเตอร์ของการกระจาย $D$ ดังนี้

$$k'' = -D\frac{\lambda^2}{2\pi c} \tag{3.9}$$

และจากการใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองสำหรับ $SiO_2$ แล้วค่า $k''$ ที่เกิดขึ้นจากการกระจายภายในเนื้อสารสามารถแสดงได้จากการคำนวณด้วย

$$k'' = -5.3\times 10^{-2}\left(1-\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)\frac{\lambda}{2\pi c^2} \tag{3.10}$$

ถ้าเราให้ค่าทั่วไปของ $\lambda \cong$ 1.55 $\mu$m, $D$=10 ps/(nm.km) ดังนั้นค่าของ $k''$ คำนวณได้เป็น -10 $ps^2$/km ซึ่งแสดงว่าพัลส์ของแสงในเส้นใยนำแสงกับความกว้างพัลส์เพียง 2-3 ps จะผิดเพี้ยนไปบนระยะทางของการแพร่ใน 1 กิโลเมตร

## 3.3 สมการโชร์ดิงเจอร์ไม่เชิงเส้น

สมการดิฟเฟอเรนเชียลของโซลิตอนหาได้จาก 2 สภาวะ โดยการพิจารณาจากสิ่งต่อไปนี้

1) ตัดส่วนที่เป็นการกระจายออก และสนใจเพียงผลของความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยนำแสง

2) ตัดส่วนที่เป็นความไม่เป็นเชิงเส้นออก และหาคำตอบของสมการดิฟเฟอเรนเชียลด้วยเอนเวลลอปฟังก์ชันในตัวกลางที่มีการกระจาย

3) รวมผลของสมการทั้งสองเป็นสมการเดียว

การหาค่าอนุพันธ์สามารถทำได้ด้วยการพิจารณาโหมดของเส้นใยนำแสงเป็นคลื่นระนาบที่สัมพันธ์กับพื้นที่ยังผลที่มีอิทธิพลมาจากสนาม ซึ่งการสมมติคลื่นระนาบขึ้นมานี้ก็เพื่อทำให้การหาอนุพันธ์สมการโซลิตอนง่ายขึ้น

พิจารณาการแพร่ของคลื่นระนาบในทิศ $z$ สามารถอธิบายได้ด้วยคำตอบของสมการคลื่น

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 (n^2 E)}{\partial t^2} \tag{3.11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $c$ คือ ความเร็วแสงในอวกาศ และ $n$ คือ ดัชนีหักเหที่พิจารณาเป็นปรากฏการณ์แบบไม่เชิงเส้นของสารไดอิเลกทริก ซึ่งโดยทั่วไปดัชนีหักเหมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับสนามไฟฟ้ากำลังสอง หรืออธิบายได้ด้วยปรากฏการณ์ของเคอร์:

$$n = n_0 + n_2|E|^2 \qquad (3.12)$$

เมื่อสนามไฟฟ้า $E$ เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วกับฟังก์ชันของระยะทาง $z$ ด้วยค่าคงที่ในการแพร่ $k$ และกับฟังก์ชันของเวลา $t$ ด้วยความถี่เชิงมุม $\omega$ การแก้ปัญหาทำได้โดยง่ายด้วยการเปลี่ยนแปลงฟังก์ชันเอนเวลลอป $A(z,t)$ ของพัลส์อย่างช้า ๆ เมื่อทำการอนุพันธ์อันดับ 2 ของ $E$ ด้วย $z$ และ $t$ ทำให้ผลจากการอนุพันธ์ของฟังก์ชัน $A$ ที่อันดับ 2 ขึ้นไปมีค่าต่ำมาก จึงสามารถตัดผลของอนุพันธ์อันดับ 2 ขึ้นไปออกได้ ถ้าแทนสมการ 3.3 และ 3.8 ลงในสมการ 3.7 และให้ $k = n\omega/c$ จะได้

$$i\frac{\partial A}{\partial z} + ik'\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{n_2}{n_0}k|A|^2 A \qquad (3.13)$$

สมการ 3.13 อธิบายถึงการแพร่ของเอนเวลลอปพัลส์ในตัวกลางไม่เชิงเส้นที่ไม่มีการกระจาย แต่สมการนี้ยังไม่ใช่คำตอบของโซลิตอน เพราะโซลิตอนจะคงรูปอยู่ได้จะต้องประกอบด้วยคุณสมบัติของการกระจายและความไม่เป็นเชิงเส้น และเพื่อพิจารณาผลของการกระจายต่อเอนเวลลอปพัลส์ ให้พิจารณาสมการดิฟเฟอเรนเชียลที่สอดคล้องกับตัวกลางเชิงเส้นที่มีการกระจายคลื่นระนาบที่มีความถี่เชิงมุม $\omega$ สามารถอธิบายได้ตามสมการ 3.1 ถึงสมการ 3.3 ได้

$$i\frac{\partial A}{\partial z} + ik'\frac{\partial A}{\partial t} = -\frac{1}{2}k''\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} \qquad (3.14)$$

สมการดิฟเฟอเรนเชียลของเอนเวลลอปพัลส์ที่ถูกต้องนี้ได้ให้พัลส์เดินทางในตัวกลางซึ่งแสดงการกระจายในอันดับ 1 เท่านั้น โดยในเทอมขวาของสมการ 3.13 บอกถึงการเปลี่ยนแปลงในคลื่นที่เคลื่อนที่จากความไม่เป็นเชิงเส้นของตัวกลาง ขณะที่ในเทอมข้างขวาของสมการ 3.14 บอกถึงการเปลี่ยนแปลงในคลื่นที่เคลื่อนที่จากการกระจาย ถ้าผลของปรากฏการณ์ทั้ง 2 มีค่าน้อย ๆ อย่างเช่นที่เป็นอยู่ในเส้นใยนำแสงทั่วไปซึ่งผลทั้งสองสามารถนำมารวมกันได้ เพื่อให้ได้สมการคลื่นโซลิตอนในตัวกลางที่ไม่เป็นเชิงเส้นและที่มีการกระจายดังสมการ

$$i\frac{\partial A}{\partial z} + ik'\frac{\partial A}{\partial t} = -\frac{1}{2}k''\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{n_2}{n_0}k|A|^2 A \qquad (3.14)$$

เพื่อต้องการเปลี่ยนสมการของโซลิตอนตามสมการที่ 3.14 ให้อยู่ในรูปนอร์มอลไรซ์ (normalized) ได้มีการเปลี่ยนมาใช้ตัวแปรในรูป

$$\xi = \frac{k''z}{t_0^2} = \frac{z}{z_0} \qquad (3.15)$$

$$\tau = \frac{\left(t - z/v_g\right)}{t_0} \qquad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u(z,t) = t_0\left(\frac{n_2 k}{n_0 k''}\right)^{1/2} A = \frac{A}{\sqrt{P_0}} \qquad (3.17)$$

เมื่อ $t_0$ คือ ความกว้างของพัลส์, $P_0$ คือ พีคของกำลังงาน และ $z_0$ คือ ระยะทางในการกระจาย ซึ่งกำหนดได้เป็น

$$z_0 = \frac{t_0^2}{k''} \qquad (3.18)$$

ดังนั้นสมการ 3.14 จึงเปลี่ยนได้เป็นสมการโชร์ดิงเจอร์แบบไม่เชิงเส้น [nonlinear Schrodinger equation (NLS)] คือ

$$i\frac{\partial u}{\partial \xi} - \mathrm{sgn}(k'')\frac{1}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + N^2|u|^2 u = 0 \qquad (3.19)$$

โดยที่ $\mathrm{sgn}(k'')$ ให้ค่า +1 เมื่อ $k''$ เป็นบวก (normal GVD) และให้ค่าเป็น -1 เมื่อ $k''$ เป็นลบ (anomalous GVD) และพารามิเตอร์ $N$ กำหนดได้เป็น

$$N^2 = \beta\ P_0 z_0 = \gamma\ P_0 t_0^2 / |k''| \qquad (3.20)$$

เมื่อ $\beta$ คือ พารามิเตอร์ของความไม่เป็นเชิงเส้นที่มีอิทธิพลต่อการมอดดูเลทของเฟสด้วยตนเอง (SPM) ซึ่งแทนได้ด้วยสมการ

$$\beta = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}} = \frac{n_2}{n_0}k \qquad (3.21)$$

เมื่อค่าของ $N$ แสดงถึงการรวมกันแบบไร้ทิศทางของพัลส์และพารามิเตอร์ของเส้นใยนำแสง

## 3.4 โซลิตอนพื้นฐานและในอันดับสูงขึ้น

สมการ NLS เป็นสมการชนิดพิเศษของสมการดิฟเฟอเรนเชียลแบบไม่เชิงเส้นที่สามารถแก้สมการได้อย่างถูกต้องด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ คือ วิธีการกระเจิงกลับ (inverse scattering method) แม้ว่าคำตอบของโซลิตอนจะมีอยู่ทั้งในการกระจายแบบปกติ (normal GVD) และแบบไม่ปกติ (anomalous GVD) ก็ตาม แต่พัลส์ที่แสดงตัวเหมือนโซลิตอนพบได้เพียงกรณีของการกระจายแบบไม่ปกติ ($k''$<0) เรียกว่า "โซลิตอนด้านสว่าง"(bright soliton) ส่วนในกรณีของการกระจายแบบปกติ ($k''$>0) คำตอบจะเกิดในรูปการลดลงของ dip ใน constant background ดังนั้นคำตอบของกรณีนี้จึงเป็น "โซลิตอนด้านมืด"(dark soliton) ซึ่งในทางปฏิบัติจะพัฒนาเฉพาะ bright soliton เท่านั้น

ในกรณีของการกระจายแบบไม่ปกติ ($k''$<0) สมการ 3.19 จึงเปลี่ยนรูปเป็น

$$i\frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + N^2|u|^2 u = 0 \qquad (3.22)$$

สมการนี้แก้ปัญหาได้ด้วยวิธีการกระเจิงกลับ จึงเป็นเหตุผลให้โซลิตอนคงรูปร่างได้เพียงค่า $N$ ที่เป็นจำนวนเต็ม ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อพัลส์อินพุทมีแอมพลิจูดเริ่มต้นเป็น

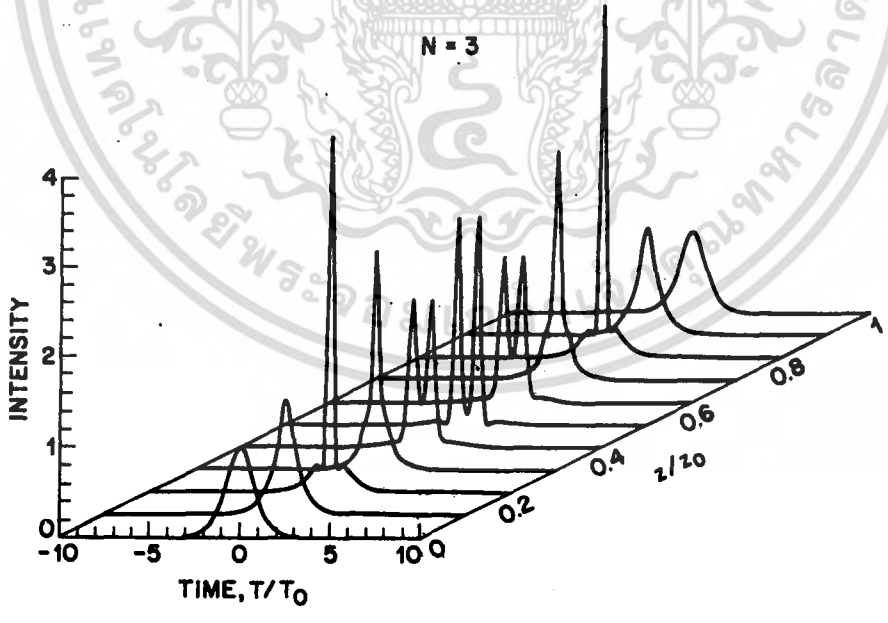
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u(0,\tau) = \text{sech}(\tau) \qquad (3.23)$$

จะถูกส่งเข้าไปเส้นใยนำแสง เมื่อ $N=1$ ซึ่งจะได้พัลส์ที่ไม่เปลี่ยนรูปร่างระหว่างการแพร่ แต่ถ้า $N>1$ เป็นเหตุให้รูปร่างของพัลส์อินพุทจะมีลักษณะเป็นช่วง ๆ ที่กลับไปเป็นเหมือนพัลส์เริ่มต้นได้ที่ $\xi = m\pi/2$ ; $m$ เป็นจำนวนเต็ม ดังนั้น โซลิตอนที่สอดคล้องกับ $N=1$ เรียกว่า "โซลิตอนพื้นฐาน" (fundamental solitons) และโซลิตอนที่สอดคล้องกับจำนวนเต็มค่าอื่นของ $N$ เรียกว่า "โซลิตอนอันดับสูง"(higher-order solitons) จากการที่ คาบของโซลิตอน $\tau_s$ เป็นระยะทางของโซลิตอนอันดับที่ $N$ เมื่อกลับคืนสู่รูปร่างเริ่มต้นของพัลส์และจาก $\xi = z/z_0$ จึงให้คาบของโซลิตอนเป็น

$$z_s = \frac{\pi}{2} z_0 = \frac{\pi}{2} \frac{t_0^2}{|k''|} \xi \qquad (3.24)$$

จากการพิจารณาพบว่าคาบของโซลิตอน $z_s$ และโซลิตอนอันดับที่ $N$ เป็นตัวแสดงบทบาทที่สำคัญทางทฤษฎีในโซลิตอนของแสง ตามรูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างในการสร้างโซลิตอนอันดับที่ 3 ($N=3$) บนคาบของโซลิตอนค่าหนึ่ง ในขณะที่พัลส์เดินทางไปในเส้นใยนำแสงพัลส์จะหดตัวครั้งแรกตามเศษส่วนของความกว้างพัลส์เริ่มต้นและแตกเข้าไปในองค์ประกอบต่าง ๆ แล้วจากนั้นจึงกลับมารวมกันอีกครั้งที่คาบสุดท้ายของโซลิตอนเพื่อกลับคืนสู่รูปร่างเดิมของพัลส์ ลักษณะที่คล้ายคลึงกันนี้เกิดขึ้นกับค่าอื่น ๆ ของ $N$ ยกเว้นที่ $N=1$ จึงจะให้รูปร่างของพัลส์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการแพร่




**รูปที่ 3.2 แสดงการพัฒนาโซลิตอนอันดับที่ 3 ($N=3$) บนคาบของโซลิตอน**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสอดคล้องกันในคำตอบของโซลิตอนพื้นฐาน สามารถหาได้จากการแก้สมการ 3.19 โดยตรง โดยไม่ต้องกลับไปใช้วิธีการกระจายกลับ ด้วยการสมมติว่าคำตอบของพัลส์ยังคงอยู่ในรูปดังสมการ..

$$u(\xi,\tau)=V(\tau)\exp(i\phi) \qquad (3.25)$$

โดยที่ $V$ ต้องเป็นอิสระกับค่า $\xi$ เพื่อแสดงรูปแบบของโซลิตอนพื้นฐานในการรักษารูปร่างของแอมพลิจูด (amplitude profile) ของพัลส์เอาไว้ในระหว่างการแพร่ ส่วนเฟส $\phi$ สามารถแปรผันได้กับทั้ง $\xi$ และ $\tau$ ถ้าแทนสมการ 3.25 ลงไปในสมการ 3.19 โดยแยกส่วนจริงกับส่วนจินตภาพออกจากกัน สิ่งที่จะได้สมการทั้ง 2 คือ $V$ และ $\phi$ โดยสมการเฟสให้ $\phi$ ที่ควรเป็นได้ในรูป

$$\phi(\xi,\tau)=K\xi \qquad (3.26)$$

เมื่อกำหนดให้ $K$ คือ ค่าคงที่ ต่อมาสำหรับฟังก์ชัน $V(\tau)$ พบว่าใช้แก้ปัญหาสมการดิฟเฟอเรนเชียลอันดับ 2 แบบไม่เชิงเส้นดังสมการ

$$\frac{d^2V}{d\tau^2}=2V\left(K-V^2\right) \qquad (3.27)$$

เมื่อกำหนดให้ $N=1$ จากนั้นแก้สมการโดยการคูณตลอดด้วย $2\left(dV/d\tau\right)$ แล้วอินทิเกรทบน $\tau$ ผลลัพธ์ก็คือ

$$\left(\frac{dV}{d\tau}\right)^2=2KV^2-V^4+C \qquad (3.28)$$

โดยที่ $C$ เป็นค่าคงที่ของการอินทิเกรท เมื่อใช้เงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ที่ $|\tau|=\infty$ ค่าของ $V$ และ $dV/d\tau$ จะหมดไป ดังนั้น $C$ จึงเท่ากับ 0 และเมื่อ $K$ เป็นค่าคงที่ที่หาได้จากการใช้เงื่อนไขขอบเขตอื่นที่ $\tau=0$ จะให้ค่า $V=1$ และ $dV/d\tau=0$ ที่ peak ของโซลิตอน ซึ่งให้ $K=\frac{1}{2}$ ดังนั้น $\phi=\xi/2$ เมื่ออินทิเกรทสมการ 3.25 จึงได้คำตอบของสมการคือ

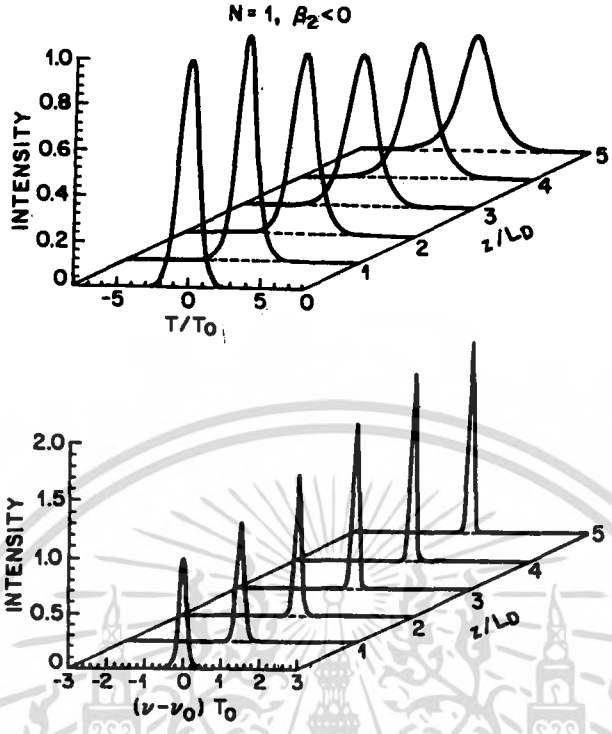
$$V(\tau)=\text{sech}(\tau) \qquad (3.29)$$

ดังนั้นจากสมการ 3.23 จึงได้รับสมการของโซลิตอนพื้นฐานจากการอินทิเกรทสมการ NLS โดยตรงในรูปไฮเพอร์โบลิคเซคแคนท์ (hyperbolic secant) คือ

$$u(\xi,\tau)=\text{sech}(\tau)\exp\left(i\xi/2\right) \qquad (3.30)$$

สมการนี้แสดงว่า เมื่อพัลส์อินพุทเดินทางในเส้นใยนำแสง จะเกิดการเลื่อนของเฟส $\xi/2$ ขณะที่แอมพลิจูดคงที่ ซึ่งคุณสมบัติของโซลิตอนพื้นฐานนี้ ทำให้เกิดแนวคิดสำหรับการสื่อสารทางแสงด้วยหลักการสำคัญที่ว่า ที่ $N=1$ เมื่ออินพุทพัลส์มีรูปร่างเป็น hyperbolic secant โดยความกว้างของพัลส์และพีคของกำลังงานมีความสัมพันธ์กับสมการที่ 3.19 แล้ว ผลของการกระจายในไฟเบอร์จะถูกชดเชยด้วยความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยนำแสงเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 3.3 แสดงการจำลองการกำเนิดทางจำนวนของอินพุทพัลส์แบบเกาส์เซียล (Guassian pulse) ที่ $N$=1**

คุณสมบัติของโซลิตอนของแสงที่น่าสนใจ คือความมีเสถียรภาพ กล่าวคือ แม้ว่าโซลิตอนพื้นฐานต้องการรูปร่าง hyperbolic secant ที่เหมาะสมกับพีคของกำลังงานที่สอดคล้องกันอย่างถูกต้องตามสมการ 3.19 ที่ $N$=1 แต่โซลิตอนก็สามารถทำให้เกิดได้แม้รูปร่างของพัลส์และพีคของกำลังงานเบี่ยงเบนออกจากสภาวะอุดมคติ

จากรูปที่ 3.3 แสดงการจำลองการกำเนิดทางจำนวนของอินพุทพัลส์แบบเกาส์เซียล (Guassian pulse) ที่ $N$=1 เมื่อกำหนดให้

$$V(0,\tau) = \exp(-\tau^2/2) \qquad (3..31)$$

จะเห็นได้ว่าพัลส์พยายามจัดรูปร่างและความกว้างพัลส์ให้ไปเป็นโซลิตอนพื้นฐานจนได้รูป hyperbolic secant กรณีที่ $\xi >> 1$ โดยพฤติกรรมที่คล้ายคลึงกันนี้ พบได้เมื่อ $N$ เบี่ยงเบนออกไปจาก 1 แต่ก็ไม่อยู่ในหลักการของโซลิตอนอันดับที่ $N$ ดังนั้น โซลิตอนก็สามารถเกิดขึ้นได้เมื่ออินพุทพัลส์ของ $N$ อยู่ในช่วง $N$-1/2 ถึง $N$+1/2 โดยเฉพาะในโซลิตอนพื้นฐานสามารถกระตุ้นได้ด้วยค่า $N$ ในช่วง 0.5-1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**รูปที่ 3.4 แสดงการพัฒนาพัลส์ที่มีค่า $N$=1.4 ในช่วง $\xi$=1-10 ไปเป็นโซลิตอนพื้นฐาน($N$=1) ด้วยการปรับพีคกำลังงานและความกว้างพัลส์**

รูปแบบจำลองของโซลิตอนที่ $N$=1.4 บนช่วง $\xi$=0-10 ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ด้วยการให้สภาวะเริ่มต้นของการแก้สมการ NLS เป็นตามสมการ 3.20 พบว่าในตอนแรกความกว้างของพัลส์ลดลงไปกับการแพร่ และแกว่งไปมารอบค่าของสภาวะพร้อม (steady-state) และกลายมาเป็นค่าคงที่ในที่สุดหลังจากอินพุทได้จัดรูปเพื่อทดแทนสภาวะ $N$ ด้วยตนเอง โดยทั่วไปการเบี่ยงเบนออกจากเงื่อนไขทางอุดมคติเพียงเล็กน้อย ไม่มีผลต่อการแพร่ของโซลิตอนแต่อย่างใด เพราะพัลส์สามารถจัดรูปให้เป็นโซลิตอนพื้นฐานได้ด้วยตัวมันเอง เพียงแต่จะมีพลังงานส่วนหนึ่งสูญเสียไปในขณะการเปลี่ยนเฟสการเคลื่อนที่สำหรับคลื่นที่มีการกระจาย ดังนั้นจึงเป็นประโยชน์ต่อการปรับตัวให้สอดคล้องกับเงื่อนไขของอินพุทที่ใกล้เคียงกับความต้องการในอุดมคติเท่าที่จะเป็นไปได้

## 4.5 สรุป

สมการดิฟเฟอเรนเชียลจะหาได้จากการพิจารณา

1). ส่วนผลของความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยนำแสงโดยไม่พิจารณาในส่วนของการกระจายออก

2). หาคำตอบจากส่วนของสมการดิฟเฟอเรนเชียลด้วยเอนเวลลอปฟังก์ชันในตัวลางที่มีการกระจายโดยตัดส่วนของการกระจายออก

3). พิจารณาผลรวมของสมการจากการรวมคำตอบทั้ง 2 ที่เป็นสมการเดียวจะได้เป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียลของคลื่นโซลิตอนในตัวกลางที่ไม่เป็นเชิงเส้นและมีการกระจายแล้วเปลี่ยนสมการโซลิตอนให้อยู่ในรูปนอร์มอลไรซ์จะได้สมการโซดิงเจอร์แบบไม่เชิงเส้น คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i\frac{\partial u}{\partial \xi} - \mathrm{sgn}(k'')\frac{1}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + N^2|u|^2 u = 0$$

เมื่อ $k''< 0$ เป็นกรณีของการกระจายที่ไม่ปกติ เรียกโซลิตอนนี้ว่าโซลิตอนด้านสว่างเป็นช่วงที่เหมาะแก่การติดต่อสื่อสาร ถ้า $N=1$ จะเรียกว่าโซลิตอนพื้นฐาน และ$N> 1$จะเรียว่าโซลิตอนอันดับสูงเมื่อทำการอินทิเกรทสมการ NLS จะได้อินพุทของโซลิตอนเป็นรูปร่างไฮเปอร์โบลิคเซคแคนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 4
# โซลิตอนกับการประยุกต์ใช้งาน

## 4.1 บทนำ

เนื่องมาจากความสามารถในการส่งพัลส์ไปได้ไกลโดยไม่มีการผิดเพี้ยนของสัญญาณเกิดขึ้นและอัตราเร็วในการส่งข้อมูลมีความเร็วสูงถึง $10^{12}$ บิท/วินาที (Terabit/sec) และนอกจากนั้นโซลิตอนยังคงรูปอยู่ได้แม้ในเส้นใยนำแสงที่มีการสูญเสีย เพราะการกระจายที่มีผลต่อความเข้มแสงได้หมดไป ถึงแม้ว่าจะมีการพยายามทำให้มีการสูญเสียน้อยที่สุด ตัวอย่างเช่น การใช้เส้นใยนำแสงที่ให้การสูญเสียต่ำสุด (0.01dB/km) พบว่าหลังจากแสงเดินทางได้ 100 กิโลเมตร แล้ว กำลังงานจะลดลงไป 1 dB เป็นต้น แสดงว่าการสูญเสียก็ยังคงเกิดขึ้น ดังนั้นโซลิตอนจึงเป็นที่สนใจต่อระบบการส่งสัญญาณทางแสง และด้วยความสามารถในการใช้งานของนี้ ทำให้โซลิตอนมีบทบาทที่สำคัญต่อการพัฒนาระบบการสื่อสารทางแสงและอุปกรณ์สวิทชิ่งทางแสง ดังที่จะกล่าวถึงต่อไป

## 4.2 โซลิตอนกับการสื่อสารทางแสง

ในระบบการสื่อสารทางแสง ข้อมูลจะถูกเข้ารหัสให้อยู่ในรูปเลขฐาน 2 แล้วนำมามอดดูเลทกับคลื่นพาหะ ในทางอุดมคติ เส้นใยนำแสงที่มีการสูญเสียต่ำจะให้โซลิตอนพื้นฐานแพร่ไปได้ไกลโดยไม่เปลี่ยนทั้งรูปร่างและความกว้างของพัลส์ ซึ่งจะกล่าวไปแล้ว การส่งสัญญาณแบบไม่มีการผิดเพี้ยนนี้ ได้ให้ความเป็นไปได้ในการสื่อสารด้วยอัตราบิทความเร็วสูง ด้วยระยะห่างระหว่างตัวขยายเป็นหลายพันกิโลเมตร แต่อย่างไรก็ตาม ความสามารถของระบบการสื่อสารด้วยความเร็วสูงก็ยังคงถูกจำกัดด้วยปรากฏการณ์ที่ทำให้แบนด์วิดธ์สูงสุดของโซลิตอนลดลง คือ

(1) <u>การสูญเสียภายในเส้นใยนำแสง</u> ทำให้เกิดการลดทอน ซึ่งสามารถชดเชยได้ด้วยการขยายพัลส์ไปเป็นช่วง ๆ หรือ การเพิ่มระดับสัญญาณเมื่อสัญญาณมาถึงตัวรับแสงโดยการเพิ่มกำลังงานที่ส่งเข้าไป

(2) <u>การกระจาย</u> ทำให้แบนด์วิดธ์สูงสุดถูกจำกัดด้วยการขยายความกว้างพัลส์ออก เนื่องมาจากผลของการกระจายของความเร็ว แต่ก็สามารถชดเชยได้ด้วยความไม่เป็นเชิงเส้น

(3) <u>ผลจากตัวขยายสัญญาณทางไฟฟ้า</u> จากทฤษฎีการรบกวนของอัตราการสูญเสียเพียงเล็กน้อย แสดงว่าโซลิตอนรักษาพื้นที่ของพัลส์เอาไว้ขณะที่มีการกระจายออก โดยการใช้อัตราการ

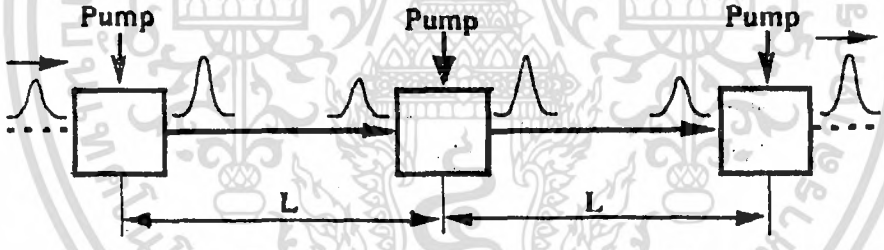
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขยายของรามาน จึงทำให้ความสูงและความกว้างของพัลส์กลับคืนสู่รูปร่างเดิม ดังนั้นข้อจำกัดนี้สามารถแก้ไขได้โดยใช้การกระเจิงของรามานที่ถูกกระตุ้น

(4) การกระทำกันระหว่างโซลิตอน เป็นผลมาจากดัชนีหักเหซึ่งขึ้นกับความถี่และเฟสของโซลิตอนเอง โดยที่ถ้าระยะห่างระหว่างพัลส์ของโซลิตอนน้อยกว่า 10 เท่าของความกว้าง จะทำให้โซลิตอนดึงดูดกันแล้วจึงแพร่ออกจากกัน และการกระทำกันของโซลิตอนสามารถทำให้ลดลงได้ด้วยการเลื่อนเฟสไป 180°

(5) timing jitter เป็นตัวสำคัญในการจำกัดการสื่อสารด้วยโซลิตอน แต่ก็สามารถลดผลของปรากฏการณ์นี้ได้ด้วยการใช้ตัวกรองสัญญาณ (filter) ร่วมกับตัวขยายสัญญาณ โดยจะก่อให้เกิดการกรองที่รุนแรงมาก ทำให้ผลของโซลิตอนที่ผ่านการกรองไม่เกิดการสูญเสียรูปร่างไป

การกรองโซลิตอนสามารถเกิดขึ้นผ่านการรวมกันของอุปกรณ์ passive อย่างง่ายหรือ ผ่านทางแบนด์วิดธ์ที่มีการจำกัดอัตราขยายในตัวขยายสัญญาณ อีกทั้งการกรองสัญญาณได้ขัดขวางการกระทำกันระหว่างพัลส์ กล่าวคือ เมื่อโซลิตอนอยู่ใกล้กันจะเกิดการดึงดูดเข้าหากันและแสดงการผลุบเข้าและโผล่ออกของสัญญาณออกมาเป็นระยะ ๆ ซึ่งปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดการสูญเสียของข้อมูล และสามารถหลีกเลี่ยงได้ด้วยตัวกรองสัญญาณที่มีรูปร่างถูกต้อง




**รูปที่ 4.1 แสดงระบบการสื่อสารด้วยโซลิตอน**

ในการสร้างโซลิตอนสำหรับการสื่อสารนี้ ได้แสดงไว้ในรูป 4.1 โดยการส่งกำลังงานจากเลเซอร์ต่อเนื่องปัมพ์เข้าไปในเส้นใยนำแสงซึ่งโซลิตอนจะแพร่ด้วยระยะระหว่างตัวขยายสัญญาณที่จำกัด L ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้ คือ

เลเซอร์ปัมพ์จะส่งคลื่นแสงต่อเนื่องเข้าไปทำปฏิกิริยากับแสงตกกระทบในเส้นใยนำแสง และด้วยค่าความถี่ของปัมพ์ที่มีกำลังงานน้อย ๆ จะกระเจิงไปกับความถี่พาหะของโซลิตอน ทำให้เกิดผลของการขยายสัญญาณขึ้น จากนั้นการขดเชยในเส้นใยนำแสงจะเกิดขึ้นแทน และโซลิตอนจึงได้ให้ลักษณะที่ต่อเนื่องของพัลส์ตลอดระยะทางในการขยายสัญญาณ L ตามมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.1 การกำเนิดและการส่งสัญญาณโซลิตอน

(Generation and Transmission of Soliton)

การกำเนิดของสัญญาณโซลิตอนมีความสำคัญต่อการแก้ปัญหาความบกพร่องของข้อมูลที่บรรจุอยู่ในโซลิตอน ซึ่งแหล่งกำเนิดแสงที่ดีควรให้แอมพลิจูดใกล้เคียงกับรูปร่างของโซลิตอนแบบไฮเปอร์โบลิคเซคแคนท์ และในการส่งสัญญาณโซลิตอน ข้อมูลไม่ควรมีการสูญเสียภายในตัวกลาง ดังนั้นจึงควรเลือกให้

1) พัลส์ของแสงมีความเข้มสูง เพื่อเข้าถึงปรากฏการณ์ไม่เชิงเส้นของแสง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของเคอร์ ที่สามารถนำไปสู่การอัดของพัลส์เพื่อชดเชยการกระจายในเส้นใยนำแสง

2) พีคของสัญญาณมีกำลังงานเหมาะสม เพื่อให้การส่งสัญญาณไปได้ระยะทางไกลมาก โดยปราศจากการลดทอน

และจากเหตุผลเหล่านี้ จึงได้มีการทดลองและพิสูจน์ผลของการส่งสัญญาณโซลิตอนของแสง โดยในการกำเนิดจำเป็นต้องมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ

#### 4.2.1.1. เส้นใยนำแสง

สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

(1) เส้นใยนำแสงชนิด passive : คือเส้นใยนำแสงธรรมดาที่ไม่มีการโดปด้วยธาตุชนิด ๆ ใด ใช้เป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณ

(2) เส้นใยนำแสงชนิด active : คือ เส้นใยนำแสงที่มีการโดปด้วยธาตุ rare-earth, นิโอดิเมียม และเออร์เบียม เป็นต้น ซึ่งมีผลให้เส้นใยนำแสงมีความสามารถในการขยายสัญญาณได้ และธาตุที่นิยมใช้โดปในเส้นใยนำแสงคือ เออร์เบียมเพราะให้การขยายสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1.55 $\mu$m

#### 4.2.1.2. แหล่งกำเนิดแสง (source)

(1) *Colour center laser*

ให้กำเนิดพัลส์ของแสงขนาดสั้นมาก ๆ ด้วยค่าที่ต่ำกว่า 10 femtosecond และมีกำลังงานเพียงพอต่อการจัดรูปโซลิตอนได้ที่ความยาวคลื่น 1.55 $\mu$m ซึ่งความยาวคลื่นนี้สามารถปรับเปลี่ยนได้ โดยมีการใช้ colour center laser นี้กับ pump Raman ป้อนสัญญาณ ทำให้เกิดสัญญาณของขบวนพัลส์ขนาด 55ps วนผ่านลูปเส้นใยนำแสง (fiber loop) หลาย ๆ ครั้ง เป็นระยะ 42 km ผลของสัญญาณที่ได้สามารถส่งไปได้ไกล 6,000 km ด้วยการลดทอนต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสียของเลเซอร์นี้ คือ

1) ด้วยความยาวคลื่นที่ปรับค่าได้ ทำให้เกิดปฏิกิริยาของโซลิตอนที่ความยาวคลื่นต่างกัน ส่งผลให้เกิดอัตราขยายอิ่มตัว (gain saturation) และการรบกวนของสัญญาณ (cross talk) คล้ายกับการส่งสัญญาณแบบปรับความเข้มได้

2) ระบบมีขนาดใหญ่เกินไปและต้องการระบบหล่อเย็นที่เหมาะสม

ดังนั้นในทางปฏิบัติของระบบการส่งสัญญาณโซลิตอนที่มีขนาดกะทัดรัดกว่านี้อาจจะเป็นที่นิยมมากกว่านี้

ปัจจัยที่สำคัญในการใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่กับระบบการส่งสัญญาณโซลิตอนคือ ผลของแบนด์วิดธ์กับเวลา (time-bandwidth) และรูปร่างของพัลส์ เพราะเชิร์ฟ (chirp) ของความถี่หรือรูปร่างของพัลส์แบบ non-sech ก่อให้เกิดส่วนที่ไม่ใช่โซลิตอน (คลื่นมีการกระจาย) ระหว่างการส่งสัญญาณ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญต่อการลดลงของ bit-error rate ในการส่งข้อมูล ดังนั้น แหล่งกำเนิดแสงชนิดต่าง ๆ ที่ถูกนำมาใช้สำหรับระบบที่มีการส่งสัญญาณด้วยโซลิตอนเป็นหลัก จึงเป็นที่นิยม นั่นก็คือ เลเซอร์ของสารกึ่งตัวนำ (semiconductor laser) ซึ่งมีขนาดกะทัดรัดและมีความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงคงที่ เพื่อให้ได้สัญญาณที่เหมือนกับสัญญาณเริ่มต้น สำหรับการส่งสัญญาณแบบไม่เชิงเส้น โดย semiconductor laser ที่นำมาใช้งานมีอยู่ด้วยกัน คือ

(2) *Mode-locked semiconductor laser & external cavity*

เป็นวิธีที่นิยมใช้สำหรับให้กำเนิดโซลิตอนของแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปกติโพรง (cavity) ของ semiconductor laser มักจะยาวประมาณ 200-300 $\mu$m และความถี่ในการล็อกโหมด (mode-locked) ควรจะมากกว่า 100 GHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ไม่สามารถปฏิบัติได้ด้วยวงจรอิเลกทรอนิคส์ แต่ความถี่ในการล็อกโหมดก็สามารถให้ลดลงได้โดยจัดให้ cavity ภายนอกยาวประมาณ 5 cm และแทน laser diode ที่จุดโฟกัสของเลนส์นูน จากนั้นการล็อกโหมด (mode-locking) จึงบรรลุผลได้ด้วยการมอทดูเลทกระแส เลเซอร์ที่ 3 GHz และเพื่อการลด cavity mode ภายใน จึงจำเป็นต้องลดการสะท้อนที่ปลายข้างหนึ่งในเลเซอร์ไดโอด

ในองค์ประกอบของ mode-locked semiconductor laser จึงประกอบด้วย ตัวกรองสเปกตรัม (spectral filter) หรือเกรทติง ที่ใช้เป็นตัวอย่างเพื่อการลดแบนด์วิดธ์ของ cavity ซึ่งเลเซอร์ชนิดนี้ทั่วไปจะให้ความกว้างพัลส์ประมาณ 10-50ps

ได้มีการทดลองใช้ mode-locked semiconductor laser ให้กำเนิดพัลส์ขนาดสั้น (<10
ด้วยอัตราการทำซ้ำ (repetition rate) อยู่ในระดับ GHz โดยได้ส่งสัญญาณไปในไฟเบอร์
index ด้วยอัตรา 4 Gbit/s ที่ความยาวคลื่น 1.559 $\mu$m ร่วมกับการใช้ Erbium dor
(EDFA) 4 ตัว โดย 2 ตัวมีหน้าที่ยกระดับกำลังงาน ส่วนอีก 2 ตัว เป็น in-lir
การส่งสัญญาณเป็นระยะทาง 136 km

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) *Gain DFB laser diode*

เลเซอร์นี้สวิทช์ได้กับ spectral filter ที่มีแถบแคบ จากที่ทราบว่าเลเซอร์ไดโอดได้กำเนิดพัลส์ของแสงจากการมอดูเลทโดยตรง ก่อให้เกิด frequency down chirping ขนาดใหญ่โตอย่างเลี่ยงไม่ได้ พัลส์ที่จำกัดรูปเนื่องจากการมอดูเลทความหนาแน่นประจุ ได้ถูกสร้างขึ้นมาจาก Fabry-perot resonator (FPR) ซึ่งเป็นเหมือนตัวกรองสเปกตรัมที่มีความละเอียด 0.17 nm โดยพัลส์ก่อนผ่าน filter มีความกว้าง 27 ps และความกว้างสเปกตรัม 1.2-1.7 nm ดังนั้นผลของ time-bandwidth $\Delta\tau\Delta\nu$ = 4.1-5.7 ซึ่งใหญ่กว่าพัลส์ที่จำกัดการเปลี่ยนรูปของเกาส์เซียลพัลส์ (0.44) หรือพัลส์รูปไฮเปอร์โปลิคเซคแคนท์ (0.31) หลังจากผ่านตัวกรองสัญญาณทำให้ความกว้างพัลส์เปลี่ยนเป็น 17 ps และความกว้างสเปกตรัมเป็น 0.20-0.21 nm และให้ผลของ $\Delta\tau\Delta\nu$ = 0.43-0.45 ดังนั้น กำลังงานของพัลส์ได้ลดลงไปในการส่งสัญญาณ 10% เนื่องจากความแคบของ FPR filter ส่วนในที่นี้ EDFA ใช้เป็นตัวขยายกำลังงานให้แก่พัลส์ของโซลิตอนเมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงนี้

ได้มีการทดลองระบบของการส่งสัญญาณด้วยโซลิตอนที่ไม่มีความผิดพลาดเป็นครั้งแรกด้วยการใช้ gain switched DFB laser ที่ความยาวคลื่น 1.55 $\mu$m ให้กำเนิดพัลส์ขนาด 16ps ภายหลังจากการอัดและขยายแบบ Raman ในไฟเบอร์เป็นระยะ 3.7 km และให้ระยะทางในการส่งสัญญาณ 23 km ต่อมา ได้ทำการส่งข้อมูลด้วยโซลิตอนในอัตรา 5 Gbit/s ในระยะทางของการส่ง 250 km ด้วยการใช้ EDFA เข้าช่วยทั้งหมด 11 ตัว เพื่อคงรูปกำลังงานของ peak สัญญาณเป็นช่วง ๆ ไปบนโซลิตอนค่าต่ำสุด (thershold soliton) ที่ $N$=1

(4) *Mode-locked ring laser*

เกิดจากการใช้ตัวกลางในการขยายเลเซอร์ในช่วงความยาวคลื่น 1.55 $\mu$m ที่ให้อัตราขยายสูงและมีโครงสร้างอย่างง่าย ซึ่งให้กำเนิดพัลส์ที่มีความกว้างสูงกว่า 10 ps

(5) *Passive mode locked fiber laser*

ให้กำเนิดพัลส์ขนาดสั้นมาก (<1ps) เมื่อได้นำ Erbuim doped fiber มาใช้ในเลเซอร์ ความยาวของ cavity ควรยาวหลายเมตรขึ้นไป ซึ่งมีผลให้การล็อกโหมดมีความถี่อยู่ในช่วงของ 100 MHz

(6) *Oscillator laser*

ให้กำเนิดแสงในช่วง GHz โดยใช้การล็อกโหมดฮาร์โมนิค (harmonic mode-locking) ซึ่งความถี่ที่ได้รับเป็นผลคูณของความถี่พื้นฐานของ cavity ดังนั้นเพื่อให้ได้ oscillator laser ที่เสถียรภาพอาจทำโดย ชดเชยการเปลี่ยนความยาวของ cavity เนื่องมาจากการสั่นหรือการเลื่อนอุณหภูมิ หรือทำโดยยับยั้ง supermode ในโพรงรูปวงแหวน (ring cavity)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(7) *Fiber ring laser*

มีการใช้ Fabry-perot elaton ในวงแหวน ได้ให้กำเนิดพัลส์ของแสงที่มีรูปร่าง symmetric-Gaussian ซึ่งไม่มีช่วงของสเปตรัมขณะเกิดอัตราการทำซ้ำของพัลส์ ทำให้มีการรักษาระดับของการล็อกฮาร์โมนิค (harmonic mode-locking) จากการใช้ elaton นี้ ความกว้างของพัลส์สามารถปรับให้อยู่ในช่วง 5-100ps ด้วย repetition rate ที่ 2.5 GHz และในการส่งสัญญาณสามารถให้ผลของการขยายที่สูงขึ้นด้วยการใช้ mode-locked semiconductor laser

เพื่อจะกำเนิด soliton train burst กับ repetition rate และความกว้างของพัลส์ที่ต้องการ ความไม่เสถียรภาพของการมอดูเลทได้จัดรูปขึ้นอย่างง่ายและมีประสิทธิภาพ เมื่อความไม่เสถียรภาพของการมอดูเลททำให้เกิดการรวมกันของแหล่งกำเนิดแสงความเข้มต่ำที่ปรับค่าได้กับปัมพ์ ให้ผลของขบวนพัลส์ที่อธิบายได้ด้วยการแยกกันระหว่างแหล่งกำเนิดแสงทั้งสองกับความกว้างของพัลส์ที่ได้จากความเข้มของปัมพ์

ในการเข้าถึงโซลิตอนที่คล้ายกันนี้ ทำได้จากการส่งสัญญาณแสงต่อเนื่องแบบคู่ความถี่ (cw dual-frequency) ผ่านไฟเบอร์ด้วย "การขยายอย่างมีประสิทธิภาพ" (effective amplification) ความแตกต่างกันของความถี่ของสัญญาณ ทั้ง 2 นี้ คือ repetition rate ของขบวนโซลิตอนเพื่อให้ได้รับค่าที่ สูงมากในช่วง GHz-THz ซึ่งในการทดลองเหล่านี้ได้ใช้ DFB laser diode 2 ตัว กับ EDFA โดยความถี่ที่เสถียรภาพของสัญญาณ cw เป็นสิ่งสำคัญ เพราะ frequency drift หรือ phase noise ของสัญญาณ มีผลต่อ timing jitter เริ่มต้นของขบวนโซลิตอน

(8) *Dual frequency in-line fiber laser*

เป็นตัวแก้ปัญหา frequency drift หรือ phase noise ที่มีเสถียรภาพมาก (linewidth $\approx$ 16 kHz และเสถียรภาพในการแยกความถี่ดีกว่า 3MHz) การใช้เลเซอร์นี้กับไฟเบอร์ที่มีรูปแบบของการกระจายคล้ายหวีจะให้ขบวนโซลิตอนที่มีความกว้างพัลส์ 2.2ps ด้วย repetition rate 59.1 GHz ที่มี phase noise < $5\times10^{-5}$

#### 4.2.1.3. มอดดูเลเตอร์ (modulator)

(1) *Semiconductor electroabsorption modulator*

ได้พัฒนาไปเป็นมอดดูเลเตอร์ภายนอก (external modulator) ที่ให้ low-chirp สำหรับระบบการส่งสัญญาณแสงที่สามารถใช้ในขบวนการเกิดโซลิตอนของแสงได้โดยการป้อน dc-biased sine voltage

(2) *InGaAs electroabsorption modulator*

ให้กำเนิดพัลส์ของแสงที่มีความกว้าง 14 ps ด้วยอัตราการวนซ้ำ 15 GHz ซึ่งให้ผลของแบนด์วิดธ์กับเวลา $(\Delta\tau\Delta\nu)$ = 0.32 เนื่องจาก linewidth enhancement factor $\alpha$ ของมอดดูเลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายนอกเล็กขนาด 0.1-0.2 การขยายออกของสเปกตรัมที่เกินมาจากมอดดูเลเตอร์สามารถตัดทิ้งได้

(3) *Electroabsorption modulator & MQW waveguide structure*

ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสง โดย MQW modulator ให้การขับแรงดันของ RF ลดลงเพราะการดูดกลืนมีความไวต่อแรงดันที่ป้อนเข้าไปมากกว่า bulk-type modulator

มาถึงความก้าวหน้าในปัจจุบันนี้ ได้กำลังพยายามสร้างวงจรรวม monolithic ของเลเซอร์ไดโอดและมอดดูเลเตอร์ลงบนชิพเดี่ยว เพื่อการสร้างแหล่งกำเนิดโซลิตอนที่มีเสถียรภาพและกะทัดรัด

### 4.2.2 พารามิเตอร์สำหรับเทคนิคในการส่งสัญญาณโซลิตอน

ในทศวรรษที่ผ่านมา เทคโนโลยีในการส่งสัญญาณแสงได้รุดหน้าอย่างรวดเร็ว โดยองค์ประกอบสำคัญที่ใช้ในการส่งสัญญาณแสงได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อประโยชน์ทางการสื่อสารซึ่งประกอบด้วย

1) เส้นใยนำแสงที่มีการสูญเสียต่ำที่สุดเป็น 0.01 dB/km ที่ความยาวคลื่น 1.55 $\mu$m ขณะที่เส้นใยนำแสงแบบเลื่อนการกระจายได้จัดทำขึ้นเพื่อลดพารามิเตอร์ของการกระจาย (group delay) ให้ต่ำกว่า 1 ps/nm.km ที่ความยาวคลื่น 1.55$\mu$m

2) เลเซอร์ของสารกึ่งตัวนำที่ให้กำลังงานเฉลี่ย 10 mW ที่ความยาวคลื่น 1.55$\mu$m

3) ตัวขยายสัญญาณแสง ชนิดที่เป็นไฟเบอร์ที่โดปด้วยเออร์เบียม (erbium) ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการใช้งาน

แต่อย่างไรก็ตาม เทคนิคในการส่งสัญญาณแสงด้วยโซลิตอนก็ยังมีปัญหาอยู่บ้าง ดังนั้นในการออกแบบระบบโซลิตอนควรคำนึงถึงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สำคัญ ดังนี้

#### 4.2.2.1. ระยะทางในการกระจาย (Dispersion distance)

ระยะทางในการกระจายสัมพันธ์กับสมการ

$$z_0 = -\frac{t_0^2}{k''} \qquad (4.1)$$

โดยที่ $t_0$ คือ normalized time

$k''$ คือ การกระจายกลุ่มของความถี่พาหะ โดย

$$k'' = \frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2} = -\frac{D\lambda^2}{2\pi c}$$

เมื่อคำตอบของโซลิตอนเป็น

$$u = \operatorname{sech} T = \operatorname{sech}\left(\tau / t_0\right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งมี full width half maximum (FWHM) ของกำลังงานเป็น 1.76 ดังนั้นเรากำหนดความกว้างพัลส์ของโซลิตอน $\tau_s$ ได้เป็น

$$\tau_s = 1.76 t_0 \qquad (4.2)$$

การใช้พารามิเตอร์ $D$ และ $\tau_s$ ทำให้ระยะทางในการกระจายจากสมการ 4.1 เป็น

$$z_0 = 6.07 \times 10^2 \frac{\tau_s^2}{\lambda^2 D} \qquad (4.3)$$

ส่วนระยะทางที่สัมพันธ์กับสภาวะการวนมาทำซ้ำเหมือนสัญญาณเริ่มต้น เรียกว่า คาบของโซลิตอน $z_s$ ซึ่งแสดงได้ด้วย

$$z_s = \frac{\pi}{2} z_0 = 9.53 \times 10^2 \frac{\tau_s^2}{\lambda^2 D} \qquad (4.4)$$

#### 4.2.2.2. Normalized damping rate Γ

normalized damping rate Γ เป็นสิ่งสำคัญในความเป็นจริงในการกำหนดคำตอบของโซลิตอน และ Γ กำหนดได้เป็นอัตรา damping ต่อระยะทางในการกระจาย ดังนั้น Γ อาจจะใหญ่ขึ้นสำหรับพัลส์ที่มีระยะทางในการกระจายยาวขึ้น สำหรับเส้นใยนำแสงที่มีอัตราการสูญเสียของกำลังงาน $\delta$ ค่าของ Γ แสดงด้วย

$$\Gamma = (1.15 \times 10^{-4}) \delta z_0 = 7 \times 10^{-2} \frac{\delta \tau_s^2}{\lambda^2 D} \qquad (4.5)$$

แทน $\lambda$=1.55$\mu$m, $D$=1 ps/nm.km , $\delta$=0.2 dB/km และ Γ=1 จะได้ $\tau_s$=13ps นั่นคือ

ถ้า Γ<< 1 จะให้ FWHM เล็กกว่า 13ps และโซลิตอนสามารถรักษาคุณสมบัติของผลจากความกว้างแอมพลิจูดของเวลา (amplitude time width) ของโซลิตอนให้คงที่ เรียกว่า adiabatic

ถ้า Γ >> 1 จะให้ FWHM มากกว่า 13ps และโซลิตอนจะสูญเสียคุณสมบัติในการรักษาแอมพลิจูดไว้ ทำให้พัลส์จะกระจายออก ซึ่งจะเกิดขึ้นแม้กระทั่งกับพัลส์เชิงเส้นที่ไม่มีการกระจาย เรียกว่า non-adiabatic

อย่างไรก็ตาม โซลิตอนสามารถถูกทำกลับไปเป็นอย่างเดิมได้ ถ้าพัลส์ถูกขยายซ้ำแล้วซ้ำเล่า โดยระยะห่างระหว่างช่วงของการขยายควรน้อยกว่าระยะทางในการขยายมาก ๆ แต่พัลส์ที่ได้จะตกอยู่ในกรณีของ non-adiabatic

#### 4.2.2.3 พีคกำลังงานโซลิตอน (Soliton peak power)

พีคกำลังงานของโซลิตอน $P_0$ แสดงได้ด้วย

$$\begin{aligned} P_0 &= v_g \varepsilon \int |E|^2 ds \\ &= c n_0 \varepsilon_0 g |E|^2 S \end{aligned} \qquad (4.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $v_g$ คือ ความเร็วกลุ่ม ซึ่ง $v_g = c / n_0$

S คือ ภาคตัดขวางของแกน

ε คือ ค่าคงที่ไดอิเลคทริค ซึ่ง $\varepsilon = \varepsilon_0 n_0$

$g$ คือ แฟคเตอร์ของการลด (reduction factor) ของพีคความเข้มสนามไฟฟ้าที่มีผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงในภาคตัดขวางของไฟเบอร์เอง

$|E|$ คือ แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้ายังผล

คำตอบของโซลิตอนที่ $N$=1 ได้มาจากการต้องการให้สนามไฟฟ้านอลมัลไรซ์ $u$ มีค่าเป็น 1

$$|u| = \left( \frac{g|E|^2 n_2 \omega_1 z_0}{c} \right)^{1/2} = 1 \qquad (4.7)$$

การจำกัด $g|E|^2$ ด้วยการใช้สมการ 4.6 และแทนค่า $z_0$ จากสมการ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างพีคกำลังงาน $P_0$ และความกว้างพัลส์ของโซลิตอน $\tau_s$ แสดงได้เป็น

$$\sqrt{P_0}\tau_s = 8.81 \times 10^{-2} \lambda^{3/2} \sqrt{SD} \qquad (4.8)$$

ในที่นี้ใช้ $n_2$= 1.3×10$^{-22}$ (m/V)$^2$ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สำหรับ $D$=1ps/nm.km , $\lambda$=1.55$\mu$m และ S= 60$\mu$m$^2$ จะให้สมการ 4.8 เป็น

$$P_0 = 1.73 / \tau_s^2 \qquad (4.9)$$

**4.2.2.4. ความจำเป็นต่อการกำเนิดโซลิตอนที่ $N$=1**

สิ่งที่จำเป็นต่อการกำเนิดโซลิตอนในเส้นใยนำแสง คือ

- เลือกให้เกิดการกระจายแบบไม่ปกติ ($k''$<0) ที่ความยาวคลื่นพาหะที่ให้การกระจายกลุ่มเป็นศูนย์ คือ $\lambda_0$=1.55$\mu$m
- เลือกความกว้างพัลส์ของโซลิตอน $\tau_s$ เพื่อความเร็วของการส่งสัญญาณที่ต้องการ โดยค่าที่ยอมรับได้คือ 25ps สำหรับระบบส่งสัญญาณด้วยความเร็ว 10 Gbit/s
- เลือกระยะห่างระหว่างโซลิตอน 2 ตัวที่ติดกัน เพื่อให้อัตราการผิดพลาดของบิทข้อมูล (bit error rate) ที่เกิดจากการกระทำกันระหว่างโซลิตอนทั้ง 2 อยู่ในขอบเขตที่พอรับได้

โดยทั่วไประยะห่างระหว่างโซลิตอนที่ใกล้เคียงกัน ต้องการประมาณ 6$\tau_s$ แต่ก็สามารถทำให้การกระทำกันของปฏิกิริยาลดลงไปได้มาก ด้วยการใช้ตัวกรองความถี่ ซึ่งให้ระยะห่างระหว่างโซลิตอนอาจเหลือ 3$\tau_s$

- เลือกพัลส์ของโซลิตอนให้เหมาะสม เพื่อขดเขยความต้องการ phase coherence ซึ่งสามารถบรรลุผลได้ด้วยการเตรียมพัลส์ที่จำกัดการเปลี่ยนรูปของฟูเรียร์ ซึ่งหมายถึงว่า ความกว้างสเปกตรัม $\Delta\omega$ ของพัลส์ที่เตรียมได้มีความกว้างที่แสดงได้ด้วยความกว้างสเปกตรัมของการเปลี่ยนรูปฟูเรียร์ในรูป sech$T$ ซึ่ง $\Delta\omega\tau_s$ = 0.315

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เลือกพีคกำลังงานที่เหมาะสม เพื่อสร้างพัลส์โซลิตอนสำหรับไฟเบอร์ที่มีพื้นที่หน้าตัดของ core S และการกระจาย $D$ เป็นไปตามสมการ 4.8 ถ้าเราให้ตัวอย่างของ $D$=1 ที่ $\lambda$=1.55$\mu$m และ S=60$\mu m^2$ สำหรับกำเนิดโซลิตอนที่มีขนาด 25ps ให้พีคกำลังงานที่ได้จากสมการ 4.9 มีค่าเป็น 2.1mW

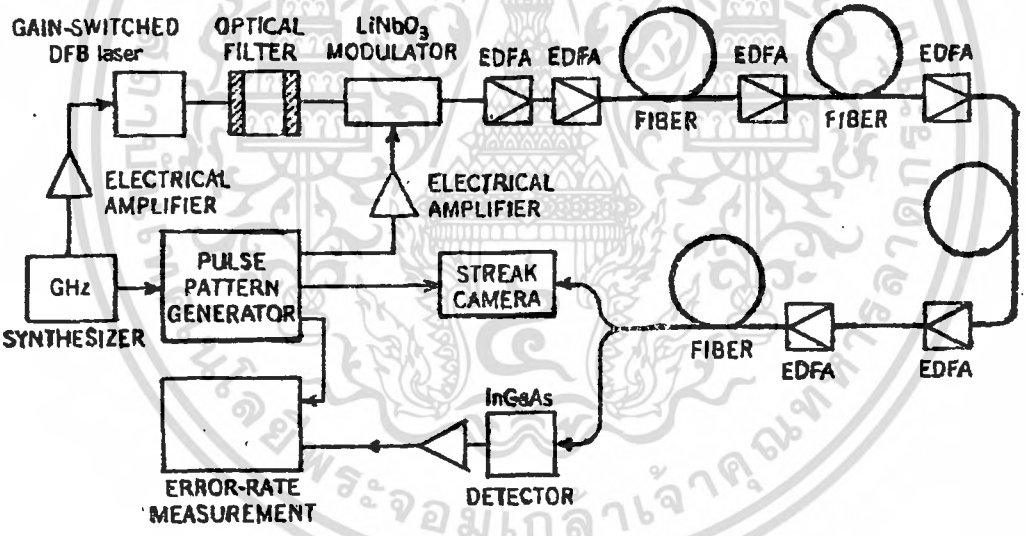
จากพารามิเตอร์ทั้ง 4 ที่กล่าวมานี้ เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการส่งสัญญาณแสงด้วยโซลิตอนที่เป็นพื้นฐานสำหรับการออกแบบระบบการสื่อสารด้วยสัญญาณโซลิตอนต่อไป

### 4.2.3 โซลิตอนกับการทดลองส่งสัญญาณ

การทดลองในการส่งสัญญาณโซลิตอนในระบบการสื่อสาร แบ่งได้ 2 ชนิดคือ

#### *4.2.3.1 การส่งสัญญาณด้วยวิธีการเชื่อมต่อเส้นใยนำแสงโดยตรง*

เป็นวิธีที่ค่อนข้างเป็นไปได้ เนื่องจากเป็นการจำลองสภาวะของสนามตามความเป็นจริง จากรูป 4.2 ได้แสดงการจัดอุปกรณ์ ซึ่งได้ทดลองส่งสัญญาณโซลิตอนด้วยอัตราบิท 3-5 Gbit/s ด้วยความยาวของเส้นใยนำแสงเกือบประมาณ 100 กิโลเมตร โดยใช้




**รูปที่ 4.2 แสดงการจัดเครื่องมือสำหรับการส่งสัญญาณโซลิตอนด้วย EDFA**

* gain-switched semiconductor laser หรือ mode-locked semiconductor laser : เป็นตัวให้กำเนิดพัลส์อินพุท

* EDFA : เป็นตัวขยายสัญญาณโดยทำหน้าที่เพิ่มพีคของกำลังงานให้ไปถึงระดับที่จำเป็นสำหรับการส่งสัญญาณโซลิตอนพื้นฐาน และทำหน้าที่ชดเชยการสูญเสียในแต่ละส่วนของเส้นใยนำแสงจากการส่งกระแสบิทของโซลิตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

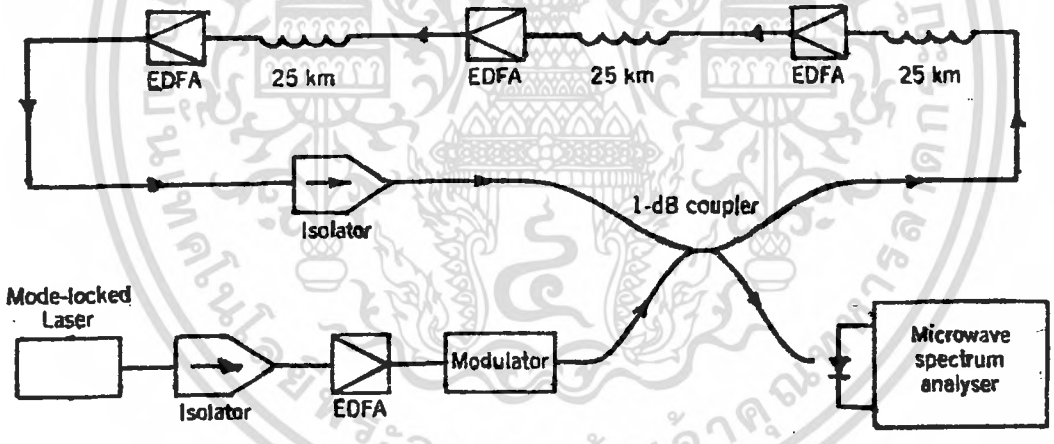
* $LiNbO_3$ external modulator : ใช้เป็นตัวกำหนดสัญญาณบนขบวนพัลส์ โดยทำหน้าที่จำกัดสัญญาณ เมื่อพัลส์ที่มีบิทเป็น "0" ถูกส่งเข้าไป และสร้างการไหลของบิทที่แสดงการมีอยู่และการขาดไปของโซลิตอน ที่สอดคล้องกับบิท "1" และ "0" ตามลำดับ

ในเทคนิคนี้ได้มีการใช้ทั้งตัวขยายสัญญาณแบบ EDFA และรามาน ในการส่งสัญญาณ โดย EDFA 2 ตัว ใช้ยกระดับกำลังงานของขบวนพัลส์อินพุท ในขณะที่ ตัวขยายแบบรามานใช้ส่งสัญญาณในเส้นใยนำแสงที่ใช้ในการปัมพ์ด้วยเซมิคอนดัคเตอร์เลเซอร์

ระยะห่างระหว่างตัวขยายสัญญาณอยู่ในช่วง 25-40 กิโลเมตร เพื่อแก้ปัญหาในข้อกำหนด $L << z_0$ ซึ่งในการทดลองหนึ่งให้อัตราบิทสูงได้ถึง 20 Gbit/s ไปบนระยะทาง 70 กิโลเมตร ด้วยคาบของโซลิตอน $z_0$ เพียง 3.7 กิโลเมตร ในขณะที่ระยะห่างระหว่างตัวขยายสัญญาณ $L$ = 23 กิโลเมตร

### *4.2.3.2 การส่งสัญญาณด้วยวิธีการหมุนเวียนภายในลูป*

จากรูป 4.3 แสดงวิธีการหมุนเวียนภายในลูป เพื่อแสดงความสามารถอันมีประสิทธิภาพต่อระบบการสื่อสารโซลิตอน จากการใช้ EDFA เป็นตัวขยายสัญญาณแบบ in-line




**รูปที่4.3 แสดงการจัดเครื่องมือในการส่งสัญญาณโซลิตอนด้วยการติดตั้งให้มีการหมุนเวียนภายในลูป**

จากการทดลองได้ส่งสัญญาณโซลิตอนขนาด 50ps ไปบนระยะทาง 1000 กิโลเมตร โดยการใช้ลูปของเส้นใยนำแสงยาว 75 กิโลเมตร และวาง EDFA 3 เส้นเป็นระยะทุก ๆ 25 กิโลเมตร คาบของโซลิตอนที่ใช้ในการทดลองนี้เป็น 680 กิโลเมตร เพื่อให้ได้สภาวะ $L << z_0$ ที่ถูกต้องยิ่งขึ้น และเนื่องจากการใช้แหล่งกำเนิดสัญญาณชนิด mode-locked color center ทำให้อัตราบิทที่ได้มีค่าต่ำเป็น 200 Mb/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมีการส่งสัญญาณด้วยอัตราบิทที่สูงขึ้น ด้วยระยะทางไกลขึ้นจะทำให้เกิดผลของ timing jitter ขึ้น แต่อย่างไรก็ตามก็สามารถลดปัญหาของ timing jitter (ซึ่งเกิดขึ้นจากสัญญาณรบกวนของตัวขยายสัญญาณ) นี้ได้ด้วยการใช้ $LiNbO_3$ modulator แทรกไว้ภายในลูป โดยตัวมอดูเลเตอร์นี้มีหน้าที่รักษารูปของโซลิตอนให้เคลื่อนที่ไปได้อย่างต่อเนื่อง

ปัจจุบันนี้ได้มีการใช้ตัวมอดูเลเตอร์ภายในลูปยาว 510 กิโลเมตร ร่วมกับการใช้ EDFA เป็นระยะ 50 กิโลเมตร เมื่อส่งสัญญาณโซลิตอนด้วยอัตรา 10 Gb/s ทำให้พัลส์สามารถคงรูปอยู่ได้เป็นระยะทางเกือบล้านกิโลเมตร ($10^6$ km)

### 4.2.4 หลักการออกแบบระบบการสื่อสารของโซลิตอน

สำหรับการส่งข้อมูลในระยะทางไกล จำเป็นต้องให้บิทข้อมูลอยู่ในมีความเสถียรภาพสูง แม้ว่าระยะทางของแพร่จะไปได้ไกลขึ้น และต้องยอมให้ความยาวคลื่นมีการมัลติเพล็กซ์ (การส่งข้อมูลในเวลาเดียวกันด้วยความยาวคลื่นมากกว่า 2 ความยาวคลื่นขึ้นไป)

ตัวแปรที่สำคัญในการพัฒนาให้โซลิตอนมีความสามารถในการส่งสัญญาณ นั่นคือ แบนด์วิดธ์ของระบบต้องไม่ถูกจำกัดด้วยตัวขยายสัญญาณที่สามารถขยายได้ 100-1000 Gb/s และในอัตราการส่งข้อมูลอย่างน้อยที่สุดควรเป็น 10 Gb/s หรือควรยอมให้มีการส่งผ่านข้อมูลในระยะทางไกลได้ไม่สิ้นสุดบนข้อมูลที่ไม่จำกัด ทั้งนี้เนื่องจาก โซลิตอนไม่มีการเปลี่ยนรูปร่างระหว่างการแพร่ด้วยพัลส์ขนาดสั้นถึง 1 ps และช่วงความแตกต่างระหว่างบิทสั้น

ด้วยเหตุเหล่านี้ จึงได้มีการศึกษาระบบการสื่อสารโซลิตอนโดยการใช้ปรากฏการณ์รามานเพื่อขยายพัลส์ของโซลิตอน ด้วยการให้คลื่นปัมพ์ฉีดเข้าไปในเส้นใยนำแสงผ่าน directional couler ซึ่งทำหน้าที่นำความถี่ปัมพ์กลับออกมาและไม่คัปปลิ้งแสงที่ความถี่ของโซลิตอน และจะทำการเลือกความถี่ทุก ๆ 20-60 กิโลเมตร

เพื่อหลีกเลี่ยงการกระทำกันของโซลิตอนและหลีกเลี่ยง timing jitter ที่เกิดขึ้นจากขบวนการปลดปล่อยทางธรรมชาติพื้นฐาน Mollenauer จึงได้เสนอแนะว่า ระยะห่างระหว่างพัลส์เป็น $T = 10 \times \Delta t$ โดยในตาราง 4.1 ได้จัดการออกแบบและความสามารถของพารามิเตอร์ในระบบโซลิตอนที่ได้เสนอไว้โดย

$L$ คือ ช่องว่างของระยะระหว่างการฉีดที่จุดของคลื่นปัมพ์ของรามานใน 2 ทิศทาง

$z_0$ คือ ระยะห่างที่เป็นไปได้ตามสมการ

$$z_0 = \frac{\pi}{2}\frac{\tau^2}{k''} \cong 0.5\frac{(\Delta t)^2}{k''}$$

$R = 1/(10 \times \Delta t)$ คือ แบนด์วิดธ์สูงสุดของสัญญาณที่พบได้

$Z$ คือ ความยาวทั้งหมดของเส้นใยนำแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| Design No. | $L$ (km) | $z_0$(km) | $\Delta t$ (psec) | $P_{max}$(mW) | $R$(GHz) | $Z$ (km) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 30 | 6 | 5.5 | 50 | 18.0 | 1600 |
| 2 | 40 | 11 | 7.5 | 27 | 13.0 | 2200 |
| 3 | 50 | 17 | 9.4 | 18 | 10.6 | 2700 |
| 4 | (~50) | 30 | 12.3 | 10 | 8.1 | 3600 |
| 5 | (~50) | 50 | 16.0 | 6.1 | 6.2 | 4700 |
| 6 | (~50) | 100 | 22.6 | 3.0 | 4.4 | 6600 |

เมื่อให้ $A_{eff}$=25$\mu$m$^2$ ; $k''$=—2.4 psec$^2$/km

**ตารางที่ 4.1** แสดงตัวอย่างของการออกแบบสัญญาณโซลิตอน ในช่องสัญญาณเดียว ด้วยระบบที่มีอัตราบิทสูง

เมื่อใช้แบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ พบว่า ความไม่เสถียรภาพของเรโซแนนซ์จะค่อย ๆ ปรากฏขึ้น ถ้า $z_0 = L/8$ ในกรณีนี้พลังงานและความกว้างของโซลิตอนมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปในช่วงกว้าง ซึ่งสภาวะเหล่านี้หลีกเลี่ยงได้จากการออกแบบดังที่ระบุไว้ตามตาราง 4.1

### 4.3 โซลิตอนในอุปกรณ์สวิทชิ่งเชิงแสง

ความมุ่งหมายของระบบสวิทชิ่งในอนาคตได้ไปถึงจุดสูงสุดในการเข้าถึงข้อมูลด้วยอัตรา Tb/s ซึ่งมีผลมาจากจุดยืนในการค้นคว้าวิจัย เพราะหมายความถึงว่า ระบบจำเป็นต้องมีความแตกต่างของอุปกรณ์และโครงสร้างมากกว่าที่เป็นอยู่ในปัจจุบันนี้

ระบบในอนาคตเหล่านี้อาจใช้หลักเกณฑ์ของการสวิทช์ทางแสงในด้านคุณสมบัติทางแสงที่มีอยู่มาใช้เป็นประโยชน์ในด้าน

(1) การเชื่อมต่อภายในอุปกรณ์โฟโตนิคส์ เนื่องจากแสงได้ให้การเปลี่ยนรูปของควอนตัมอิมพีแดนซ์ที่ตัวรับสัญญาณ

(2) การปฏิบัติการในลอจิกเปรียบเทียบชั้นสูง เนื่องจากลำแสงในอวกาศสามารถทะลุผ่านซึ่งกันและกันได้โดยไม่เกิดการแทรกสอด

(3) อุปกรณ์สวิทชิ่งความเร็วสูง เนื่องจากธรรมชาติของการเปลี่ยนสถานะของแสงเกือบทั้งหมดอย่างทันที

#### 4.3.1 คุณลักษณะของโซลิตอนในการสวิทชิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะที่สำคัญของโซลิตอนที่ใช้ในการสวิทชิ่งนั่นคือ โซลิตอนทำตัวในลักษณะเหมือนบิทข้อมูลเริ่มต้นและพัลส์ทั้งหมดสวิทช์ไปเป็นกลุ่ม ตัวอย่างเช่น ในการลดทอนของรูปร่างพัลส์โดยทั่วไปจะขึ้นกับความเข้มของพัลส์แบบเกาส์เซียลหรือไฮเปอร์โบลิคเซคแคนท์ นั่นคือ พัลส์เหล่านี้มีความเข้มในช่วงต่อเนื่องและแต่ละค่าความเข้มจะสวิทช์ได้แตกต่างกัน

โซลิตอนพื้นฐานมีเฟสตามขวางของพัลส์ในรูปแบบเดียวกันและได้รับการสวิทช์พัลส์ที่สมบูรณ์ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการสร้างเกทที่สามารถลดระดับเป็นขั้น ๆ ได้ด้วย contrast ratio มีค่าสูง นอกจากนี้ เนื่องจากโซลิตอนสมดุลได้ด้วยแรงในการทำปฏิกิริยา 2 ชนิดระหว่างการแพร่นั่นคือความเสถียรภาพที่ต่อต้านการรบกวนต่าง ๆ อีกทั้งโซลิตอนพื้นฐานพยายามรักษาพัลส์ให้คงรูปไว้ ซึ่งหมายความว่า หลังจากโซลิตอนเดินทางผ่านตัวขยายสัญญาณ ทำให้ทั้งแอมพลิจูดและรูปร่างพัลส์ของโซลิตอนสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้

ความได้เปรียบอย่างมากมายของโซลิตอนในฟังก์ชันของเวลา (time domain) และการสวิทช์ด้วยอัตราเร็วสูง (terabit) ด้วยการใช้พัลส์ขนาด ps หรือ fs ในเส้นใยนำแสง ทั้งนี้เนื่องมาจาก

(1) พัลส์ขนาดสั้นกับความกว้างของแบนด์วิดธ์ ที่ไม่มีผลของการกระจายความเร็วกลุ่มและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยนำแสง ทำให้พัลส์อยู่ในสภาพสมดุล

(2) การสวิทช์ทางแสงมีความได้เปรียบจากคุณสมบัติต่าง ๆ ของโซลิตอน เช่น ความไม่เสถียรภาพจากการมอดดูเลท, การชนกันแบบยืดหยุ่น และการจับและเลื่อนโซลิตอน

(3) ธรรมชาติที่เหมือนอนุภาคของโซลิตอน สามารถนำไปสู่การสวิทช์ด้วยพลังงานต่ำเพราะการเปลี่ยนความถี่เพียงเล็กน้อยนำไปสู่การเลื่อนของเวลาให้กว้างขึ้น

(4) การสวิทช์ของโซลิตอนพยายามสวิทช์ได้กับการส่งสัญญาณระยะไกล และสามารถทำงานเพื่อให้ได้พัฒนาการทางเทคโนโลยีเหมือนเช่น EDFA

### 4.3.2 อุปกรณ์สวิทชิ่งความเร็วสูง

อุปกรณ์ความเร็วสูง (Ultrafast) หมายถึง การมีที่อุปกรณ์มีความเร็วในการส่งข้อมูลด้วยอัตราที่สูงกว่า 50 Gb/s หรืออย่างน้อยให้เกินกว่าความเร็วที่อุปกรณ์อิเล็คทรอนิคส์ไม่สามารถไปถึงได้

อุปกรณ์ที่มีพื้นฐานอยู่บนอัตรกิริยาของแสง ได้อาศัยการเปลี่ยนสภาวะภายในเนื้อสารของเส้นใยนำแสงเป็นส่วนมาก นั่นคือ การกระทำกันที่ให้รูปร่างของฟังก์ชันคลื่นเปลี่ยนแปลง ซึ่งไม่มีการเรโซแนนซ์และสามารถเกิดขึ้นได้ทันทีเกือบทั้งหมด และด้วยการที่อิเล็กตรอนไม่ถูกสร้างขึ้นในขบวนการทางแสงดังนั้นอุปกรณ์จึงไม่ถูกจำกัดด้วยเวลาในการรีคอมบิเนชัน (recombination time) ของพาหะในเนื้อสาร

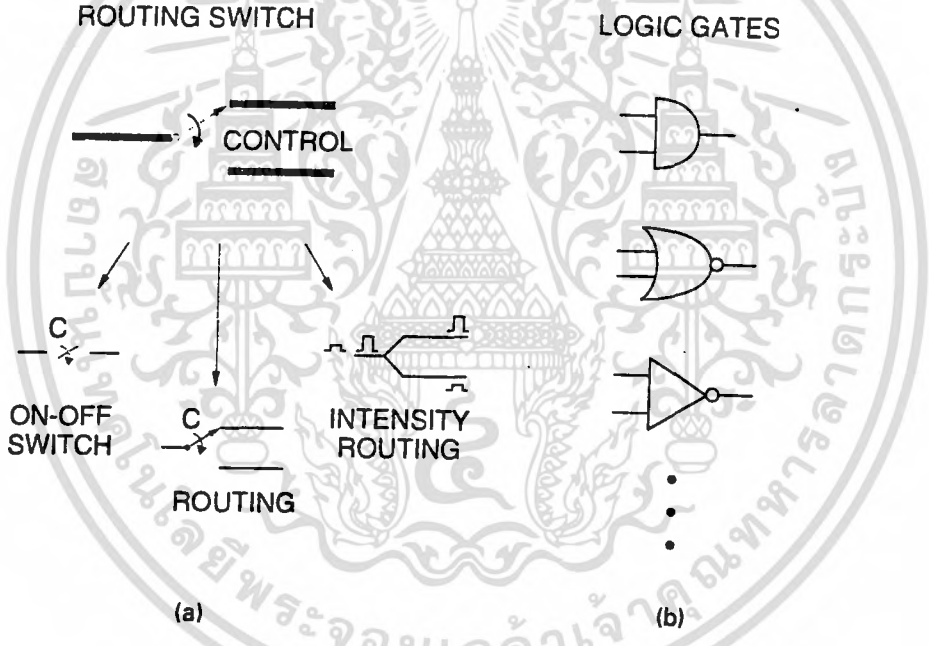
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไป การสวิทช์ทางแสงทั้งหมดสามารถเกิดขึ้นได้กับช่องว่างของแถบพลังงานต่ำ ๆ ด้วยเหตุนี้จึงเป็นการหลีกเลี่ยงการดูดกลืนทั้งแบบที่เป็นเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นและผลของความร้อนที่เกิดขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายได้ในการส่งสัญญาณด้วยอัตราบิทสูง ๆ นอกเหนือจากนั้น อุปกรณ์ทางอิเล็คทรอนิคส์จะให้พลังงานตกกระทบลงบนอุปกรณ์ทำให้เกิดความร้อนขึ้น โดยส่วนมากพลังงานมักตกกระทบลงในท่อนำคลื่น ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการสูญเสียข้อมูลขณะที่อุปกรณ์ทางแสงจะให้สัญญาณที่อุปกรณ์เอาท์พุทเหมือนสัญญาณที่อินพุทปรากฏขึ้น

อุปกรณ์สวิทชิ่งความเร็วสูง สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ ดังรูป 4.4 คือ

1) สวิทช์แบ่งเส้นทาง (routing switch)

2) ลอจิกเกท (logic gate)




**รูปที่ 4.4 แสดงอุปกรณ์สวิทชิ่ง:**
**(a) สวิทช์แบ่งเส้นทาง โดย 1 อินพุทสามารถต่อออกไปได้หลายเอาท์พุท**
**(b) ลอจิกเกท อาศัยหลักการดำเนินการของบูลีนได้ใช้เป็นพื้นฐานของค่าสัญญาณอินพุท**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสวิทช์ทั้ง 2 ชนิดจะทำงานแตกต่างกันทางพื้นฐานในลักษณะของการควบคุม ดังนี้

| สวิทช์แบ่งเส้นทาง | ลอจิกเกท |
|---|---|
| 1. ควบคุมรูปแบบทางกายภาพที่แตกต่างกันของสัญญาณมากกว่าข้อมูล | 1. ควบคุมรูปแบบทางกายภาพของสัญญาณกับข้อมูลควบคู่กัน |
| 2. แสดงสภาวะการตัดสินใจด้วยตำแหน่งหรือที่ตั้งของข้อมูลเป็นหลัก | 2. แสดงสภาวะการตัดสินใจด้วยเอาท์พุทของลอจิกในระดับ "0" หรือ "1" |
| 3. มีเส้นทางของโฟตอนจากอินพุทไปเอาท์พุท ทำให้ระดับสัญญาณอาจลดทอนต่ำลง | 3. ระดับสัญญาณและการควบคุมความเร็วถูกสร้างขึ้นใหม่ที่เอาท์พุทของแต่ละเกท ด้วยโฟตอนใหม่จากแหล่งจ่ายไฟ |

**ตารางที่ 4.2** แสดงความแตกต่างของการทำงานระหว่างสวิทช์แบ่งเส้นทางและลอจิกเกท

อย่างไรก็ตามระบบที่มีระบบดิจิตอลลอจิกเป็นพื้นฐานจะมีข้อเสียเปรียบคือ พลังงานของการสวิทช์และความต้องการแหล่งจ่ายไฟ เป็นตัวสำคัญในการจำกัดความเร็ว

### 4.3.3 สวิทช์แบ่งเส้นทาง (routing switch)

อาศัยพื้นฐานของการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสัญญาณหรือการควบคุมลำแสงที่ป้อนเข้าไปจากภายนอกเพื่อทำให้เกิดการสวิทช์ที่แปรผันกับความเข้มแสง โดยสวิทช์นี้ทำหน้าที่เป็นสวิทช์ทางกายภาพ เพราะโฟตอนเคลื่อนที่ตามธรรมชาติจากที่หนึ่งไปยังที่หนึ่ง ลักษณะของสวิทช์จะมีอิทพุทเข้าทางเดียวต่ออยู่กับเอาท์พุทพอร์ทหลายพอร์ท แต่ถ้าสวิทช์ใช้เอาท์พุทพอร์ทเพียงทางเดียว ดังนั้นสวิทช์แบ่งเส้นทางนี้จะทำงานเหมือนเป็นสวิทช์เปิด-ปิด (ON-OFF) อีกทั้งถ้าสวิทช์แบ่งเส้นทางนี้มีหลักอยู่บนความเข้มแสงอินพุท ก็อาจใช้เป็นอุปกรณ์ในการจำกัดความเข้ม หรือเป็นตัวดูดกลืนอิ่มตัว และได้มีการศึกษาอย่างแพร่หลายต่อการนำไปใช้เป็นพื้นฐานของอุปกรณ์เกทเชิงแสง ดังนี้ :

(1) <u>Kerr gate</u>

อาศัยความไม่เป็นเชิงเส้น $n_2$ ที่เปลี่ยนแปลงโดยทันที เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะของการโพลาไรซ์ ซึ่งเกิดจากการควบคุมลำแสงที่มีความยาวคลื่นแสงแตกต่างกัน การใช้งานเป็นอุปกรณ์อินพุทและเอาท์พุทเดียวสามารถใช้เป็นตัวจำกัดแสงได้ เช่น Kerr shutter และสามารถใช้เป็นอุปกรณ์ 2 เอาท์พุทที่ไม่มีอัตราขยาย เนื่องจากความต้องการพัลส์ขนาดใหญ่ขึ้นควบคุมพัลส์ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เล็กกว่า นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวดีมัลติเพล็กซ์ (demultiplexer) และตัวจำกัดแสงหรือตัวดูดกลืนที่อิ่มตัว

(2) Four-wave mixing gates (4WM)

อาศัยหลักการของ $n_2$ ที่เกิดจากการสอดคล้องกันของเฟสถูกรวมกันระหว่างความถี่ที่ใกล้กัน 2 ตัวนั้นสอดคล้องกับการควบคุมและความยาวคลื่นของสัญญาณในเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยว โดยการสอดคล้องกันของเฟสนำไปสู่อัตราขยายทางพารามิเตอร์เพื่อว่าสัญญาณขนาดเล็กสามารถควบคุมสัญญาณที่ใหญ่กว่า ซึ่งสอดคล้องกับ fan-out หรืออัตราขยายสัญญาณขนาดเล็กสำหรับอุปกรณ์

Contrast ratio สำหรับ four-wave mixing gate สามารถทำให้มีค่ามากขึ้นถ้ามีการสังเกตควบคุมความถี่ใหม่ที่ถูกสร้างรวมกันของความถี่ เมื่อมีการปฏิบัติการโดยใช้ผลของโซลิตอน ความไม่เป็นเชิงเส้นสามารถปฏิบัติการกับการสอดคล้องของเฟสสำหรับการรวมกันของ 4 คลื่น (four-wave mixing) นำไปสู่อุปกรณ์ที่มีพื้นฐานอยู่บนความไม่เสถียรของการมอดดูเลทและ 4WM สามารถใช้เพื่อจัดอุปกรณ์ non- casedable AND-gate ด้วยอัตราขยายสูง

4 WM ในอิทธิพลของโซลิตอน ได้อาศัยความไม่เป็นเชิงเส้นและการกระจายความเร็วกลุ่มเพื่อใช้จัดความไม่เสถียรของ fiber interferometer switch ที่สัมพันธ์กับการมอดดูเลทและความไม่เสถียรของการมอดดูเลทใน polarization relation switch

(3) Nonlinear directional coupler (NLDC)

โดยทั่วไปใช้เป็นเหมือนกับ อินพุทเดี่ยวที่มีแนวทางการสวิทช์ขึ้นกับความเข้ม แม้ว่า NLDC แสดงถึงหลักฟิสิกส์ที่แยบยลแต่มันอาจจะใช้เป็นเพียงตัวดูดกลืนที่อิ่มตัว เพื่อให้พัลส์ของระบบจัดรูปได้ดีขึ้นและให้ลักษณะของการสวิทช์ที่คมชัดกว่า อุปกรณ์ของเคอร์(Kerr)หรือ Mach-Zehnder

NLDC เป็นอุปกรณ์ 2 โหมด ที่มีพื้นฐานอยู่บนท่อนำคลื่น 2 เส้น เช่นเส้นใยนำแสงชนิด 2 คอร์ หรือเส้นใยนำแสงที่มีแกนของการโพลาไรซ์ 2 แกน และการสวิทช์ทำให้บรรลุผลได้ด้วยการใช้ดัชนีที่ขึ้นกับความเข้มเปลี่ยนไปจำเป็นต้องมีการเลื่อนของเฟสที่มากกว่า 2 ครั้ง($2\pi$) เพื่อปรับลงของท่อนำสัญญาณและรบกวนการคัปเปิ้ล

NLDC ยังแสดงถึงปัญหาการกระจายออกของพัลส์ไว้เป็นอย่างดีในอุปกรณ์การสวิทช์ทันทีแบบไม่เชิงเส้นและแสดงถึงความจำเป็นต่อพัลส์รูปเหลี่ยมหรือโซลิตอนที่ใช้ปรับปรุง contrast ratio ระหว่างแขนทั้ง 2 เพื่อให้ได้การสวิทช์อย่างสมบูรณ์แบบ

(4) Mach-Zehnder interferometer

เป็นระบบที่มี 2 โหมดซึ่งใช้ความแตกต่างเฟสที่ไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างแขนทั้งสองเพื่อปรับเปลี่ยนการแทรกสอดระหว่างแบบเสริมและแบบหักล้าง การจัดเครื่องมือของอินเทอร์เฟอร์โรมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตอร์ในเส้นใยนำแสงที่เสถียรภาพคือ อุปกรณ์ Sagnac แบบไม่เชิงเส้นหรือมิเรอร์ลูปทางแสงแบบไม่เชิงเส้น NOLM (nonlinear optical loop mirrer)ที่เสถียรภาพ,เป็น fiber interferometer และสามารถให้พลังงานในการสวิทช์ต่ำลงเนื่องจากความยาวของเส้นใยนำแสงที่ใช้กับอุปกรณ์อินพุทเดียว เหมือนเป็นผู้ให้รูปร่างพัลส์หรือตัวดูดกลืนอิ่มตัวเร็ว(fast saturable absorber)

NOLM ยังได้ใช้แสดงว่าโซลิตอนสวิทช์ไปเป็นกลุ่ม ดังนั้นจึงสามารถหลีกเหลี่ยงการแตกออกของพัลส์ดังที่อธิบายมาก่อนหน้านี้ จากการเพิ่มการควบคุมพัลส์ที่ความแตกต่างของความถี่หรือความแตกต่างของโพลาไรซ์ NOLM ยังสามารถใช้เป็นสวิทช์ 3 ปลายหรือ logic module ถ้าการควบคุมและพัลส์สัญญาณเดินทางผ่านกันอย่างสมบรูณ์ดังนั้น การเลื่อนของเฟสจึงถูกรวมเข้ากับความยาวในการกระทำระหว่างกัน และการเลื่อนของเฟสที่ตรงกันสามารถทำได้โดยไม่ต้องใช้พัลส์รูปเหลี่ยมหรือพัลส์โซลิตอน

สวิทช์แบ่งเส้นทาง สามารถสร้างขึ้นด้วยการเพิ่มการควบคุมลำแสงด้วยความถี่ที่ต่างกันและการดำเนินการของลอจิกยังสามารถได้รับด้วยแกนของเส้นใยนำแสงไข้วกันและการมีพัลส์โพลาไรซ์ที่ตั้งฉากทำปฏิกิริยากันซ้ำไปมาผ่านการมอดดูเลทแบบ cross-phase

### 4.3.4 ลอจิกเกท (logic gate)

อาศัยหลักการดำเนินการของบูลีนบนพื้นฐานของค่าของสัญญาณอินพุท ซึ่งการเข้าถึงทางตรรกนี้ได้ให้ประโยชน์ต่อความแม่นยำของผลจากการถูกรบกวนของระบบโดยตลอด (ในที่นี้หมายถึงว่า ข้อมูลชุดหนึ่งๆ สามารถควบคุมข้อมูลชุดอื่นได้) และนี่เป็นเหตุผลหนึ่งที่ระบบอิเล็คทรอนิคส์สมัยใหม่ได้ทำงานอยู่บนพื้นฐานของดิจิตอลลอจิก

แต่อย่างไรก็ตามก็ต้องคำนึงถึงสิ่งที่จำเป็นต่อการสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบดิจิตอล คือ

1) อุปกรณ์ต้องสามารถนำมาต่อลดระดับกันไปเรื่อย ๆ ได้ (เอาท์พุทของอุปกรณ์ตัวหนึ่งต้องใช้เป็นอินพุทของอุปกรณ์ถัดไปได้)

2) ต้องมี fan-out (เอาท์พุทของอุปกรณ์ตัวหนึ่งต้องสวิทช์ที่เกทคล้ายกันอย่างน้อย 2 ตัว)

3) ต้องเป็นตัวดำเนินการบูลีนสมบูรณ์แบบ (เช่น NOR เกท, NAND เกท)

4) การโพลาไรซ์หรือความยาวคลื่นต้องมีการกระจายเป็นมุมฉาก ในแนวแกนระยะทางและเวลา

5) อุปกรณ์ลอจิกควรมีการออสซิลเลททั้งสัญญาณอินพุทและเอาท์พุทเพื่อให้การสะท้อนของอุปกรณ์ตัวถัดไปไม่รบกวนการทำงาน

6) อุปกรณ์ดิจิตอลควรมีการรักษาระดับลอจิกไว้ เพราะการรักษาระดับลอจิกป้องกันการสะสมของสัญญาณรบกวนในแต่ละระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และความจำเป็นที่กล่าวมา ทำให้ประสิทธิภาพของระบบสามารถขยายไปได้อย่างไม่สิ้นสุด

โซลิตอนเกทที่จะกล่าวถึงมีอยู่ 3 ชนิด คือ

(1) soliton-dragging logic gates (SDLG)

มีพื้นฐานอยู่บนการกระทำกันระหว่างพัลส์โพลาไรซ์ที่ตั้งฉากกัน 2 พัลส์ในเส้นใยนำแสง birefringent โดยเฉพาะอย่างยิ่ง SDLG ได้แก้ปัญหาความจำเป็นต่าง ๆ สำหรับขบวนการดิจิตอลทางแสง เช่น fan-out,การลดระดับขั้นของสัญญาณ (cascadable) และความสมบูรณ์ของตัวดำเนินการบูลีน

ในโซลิตอน dragging ความเร็วของการเดินทางผ่านเส้นใยนำแสงขึ้นกับทั้งพัลส์เดี่ยวและพัลส์คู่ที่ปรากฏ และโซลิตอนที่สอดคล้องกันในแสงโพลาไรซ์แบบตั้งฉากได้มีการชนกันแบบไม่ยืดหยุ่นซึ่งเป็นผลจากการมอดดูเลทแบบ cross-phase และ walk-off ทำให้ศูนย์กลางของพัลส์เปลี่ยนแปลงไป

SDLG มีพลังงานในการสวิทช์ถึง 1 pJ อีกทั้ง SDLG ได้เป็นตัวอย่างหนึ่งของโครงสร้าง time-domain chirp switch (TDCS) ทั่วไปที่ริ้วของการดีเลย์ที่มีการกระจายทำตัวเป็น "lever arm" เพื่อลดพลังงานในการสวิทช์

(2) soliton interaction gates (SIG)

อาศัยการชนกันแบบยืดหยุ่นระหว่างโซลิตอนไปในแนวการเคลื่อนที่บนเส้นใยนำแสง โดยเมื่อโซลิตอนมากระทำกันขึ้นกับเฟสระหว่างพัลส์แต่หลังจากพัลส์แยกออกจากกันแล้วพฤติกรรมของโซลิตอนจะไม่เป็นอิสระต่อเฟสเริ่มต้น

ในขณะที่การเลื่อนส่วนใหญ่ของ SDLG เพิ่มขึ้นในขณะที่แพร่ด้วยมุมใหม่ ตรงกันข้ามกับ SIG ที่จะเกิดการเลื่อนเมื่อเกิดการกระทำระหว่างพัลส์เท่านั้น ดังนั้น SIG จึงยากต่อการได้รับอัตราขยายสูง ๆ หรือพลังงานในการสวิทช์ที่ต่ำลง

SIG สามารถนำมาทำเป็นอุปกรณ์ของ billiard-ball logic ด้วยความไวต่อ timing ของอินพุทพัลส์และแสดง on:off contrast ratio กว้างถึง 22:1

(3) soliton-trapping logic gates

อาศัยหลักการเช่นเดียวกับ SDLG เพราะเกทชนิดนี้เป็นกรณีพิเศษของ soliton dragging เมื่อพัลส์ 2 ตัวมีแอมพลิจูดที่เปรียบเทียบกันได้ และเป็นช่วงพิเศษของ birefringence นอกจากนี้แล้ว soliton trapping คือตัวอย่างของโซลิตอนที่สามารถขัดขวางผลของ bifringence เนื่องจากแรงที่ใช้ในการกลับสู่สภาพเดิมภายใน

การใช้งานจะเป็นเกทในรูป soliton-trapping AND-gate(STAG) ซึ่งไวต่อ timing ของพัลส์อินพุทและให้เอาท์พุทด้วยค่า contrast ratio > 20:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม้ว่า STAG ไม่มีอัตราขยายหรือไม่สามารถนำมาต่อลดระดับได้แต่ก็สามารถใช้ในระยะของระบบการสวิทช์ทางแสง เพื่อเปลี่ยนเอาท์พุทจากการเข้ารหัสแบบ time-shift keying ไป amplitude-shift keying ที่สอดคล้องกับระบบอิเลคทรอนิคส์

สรุปได้ว่าดิจิตอลลอจิกเกททั้ง 3 ชนิดได้แสดงพื้นฐานบนการมอดดูเลทแบบ cross-phase และการกระทำกันระหว่างโซลิตอนในเส้นใยนำแสง การสวิทช์ของลอจิกเกทเกิดขึ้นจากการรักษาระดับลอจิกที่แทนโฟตอนของอินพุทด้วยโฟตอนใหม่จากแหล่งจ่ายไฟ และเนื่องจากโซลิตอนพื้นฐานมีคุณสมบัติเหมือนอนุภาคจึงได้ใช้โซลิตอนในเส้นใยนำแสงทำเป็นอุปกรณ์สวิทชซึ่งก็เพื่อหลีกเลี่ยงผลจากการกระจายของความเร็วกลุ่มและความเป็นเชิงเส้นที่มีผลต่อการทำลายข้อมูล

## 4.4 บทสรุป

การปฏิวัติของระบบการสื่อสาร เริ่มต้นขึ้นเมื่อคุณสมบัติของความไม่เป็นเชิงเส้นของได้ถูกค้นพบ เทคโนโลยีไม่เชิงเส้นของแสงกำลังจะเข้ามาแทนที่เทคโนโลยีแบบเชิงเส้น ซึ่งสิ่งหนึ่งที่อาศัยหลักการส่งผ่านของพัลส์ทางแสงนั่นคือ โซลิตอน

โซลิตอนเป็นทางเลือกใหม่สำหรับการส่งสัญญาณความเร็วสูงด้วยแบนด์วิดธ์มากมายในการจุข้อมูล อีกทั้งคุณสมบัติเด่นประการสำคัญคือ ให้การสูญเสียต่ำในการส่งสัญญาณ และด้วยเหตุผลเหล่านี้ จึงได้มีการค้นคว้าและพัฒนาโซลิตอนเพื่อนำมาใช้ในระบบการสื่อสารระยะทางไกลและการใช้งานเป็นอุปกรณ์สวิทชิ่งทางแสง

สำหรับการใช้งานของโซลิตอนในระบบการสื่อสารนั้น จำเป็นต้องเข้าใจพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการส่งสัญญาณรวมไปถึงอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบในการส่งสัญญาณ โดยเลือกให้เหมาะสมกับลักษณะในการนำไปใช้งาน เพื่อให้ผลของการสื่อสารที่ได้รับมีประสิทธิภาพสูงสุด อย่างไรก็ตามมีการคาดการณ์ว่าต่อไปในปลายศตวรรษ จะมีการติดตั้งระบบการสื่อสารโดยใช้โซลิตอนอย่างแพร่หลาย โดยนำมาทำเป็นบิทข้อมูลที่มีความจุสูงในระดับการส่งสัญญาณถึง GHz ขึ้นไป และจากนั้นโซลิตอนก็จะเข้ามามีบทบาทต่อการสื่อสารข้ามทวีป

ส่วนโซลิตอนในการใช้งานเป็นอุปกรณ์สวิทชิ่งนั้น ยังคงอยู่ในระหว่างการค้นคว้าและพัฒนา เนื่องจากการสวิทช์ทางแสงด้วยความเร็วสูงขึ้นได้ก่อให้เกิดปัญหาที่ตามมาของ timing jitter, ความต่อเนื่องกันของการส่งข้อมูล เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม ด้วยลักษณะเฉพาะทางธรรมชาติของโซลิตอนเอง ก็ยังเป็นประโยชน์ต่อผลของการสวิทช์ทางแสง และในไม่ช้าการใช้งานโซลิตอนในอุปกรณ์สวิทชิ่งทางแสงก็จะเป็นที่แพร่หลายยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 5
# การศึกษาแบบจำลองของโซลิตอนจากข้อมูลทางคอมพิวเตอร์

## 5.1 บทนำ

ในโครงงานได้ศึกษาการวิเคราะห์แบบจำลองทางตัวเลขในการแพร่ของพัลส์ขนาดสั้น เพื่อสร้าง mode-locked laser โดยอาศัยพื้นฐานของการคัปเปลอร์ในเส้นใยนำแสงที่ไม่เป็นเชิงเส้นแบบ 2 คอร์ และ 3 คอร์ ผลที่ได้เหล่านี้มีความสำคัญต่อการกำเนิดพัลส์ที่คล้ายโซลิตอน เนื่องจากลักษณะเด่นของการคัปเปลอร์แบบหลายช่องสัญญาณ (n>2) ที่จำกัดการแสดงลักษณะของพัลส์ในคลื่นต่อเนื่อง และเกิดขึ้นเมื่ออินพุทพัลส์ไม่มีการกระจายความเร็วกลุ่ม เพราะปรากฏการณ์กระจายออกของพัลส์ได้จำกัดความสามารถในการคัปเปลอร์อย่างรุนแรง

จากนั้นเมื่อเข้าใจการทำงานของการคัปเปลอร์แบบ 2 คอร์และ 3 คอร์ดีแล้ว ต่อไปจะเป็นการเสนอและวิเคราะห์ mode-locked fiber laser ที่พัฒนามาจาก nonlinear directional coupler switch โดยการใช้คณิตศาสตร์พื้นฐานในการคำนวณอย่างง่าย ๆ ผลที่ได้รับคือพัลส์ที่เสถียรภาพเหมือนโซลิตอนภายใต้อิทธิพลของการกระจายความเร็วกลุ่มแบบไม่ปกติ

## 5.2 แบบจำลองพื้นฐาน

โครงสร้างของการคัปเปลอร์มีอยู่ด้วยกัน 2 แบบดังแสดงในรูป 5.1

(a) (b)

**รูปที่5.1 แสดงโครงสร้างของการคัปเปลอร์เส้นใยนำแสง:**
**(a) การคัปเปลอร์แบบ 2 คอร์ (b) การคัปเปลอร์แบบ 3 คอร์**

ในการวิเคราะห์ ได้สมมติให้สนามของการคัปปลิ้งหายไปในคอร์ใกล้เคียงที่เชื่อมอยู่ระหว่างกันเป็นแบบเดียวกัน ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการโชร์ดิงเจอร์แบบไม่เชิงเส้นที่คัปเปลอร์กันทั้ง 3 คอร์ได้ด้วยการแยกพิจารณาในโหมดเดี่ยวของแต่ละคอร์ โดยสมมติให้มีการกระจายความเร็วกลุ่มเป็นแบบไม่ปกติและความไม่เป็นเชิงเส้นเป็นบวก ในรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i\frac{\partial u_1}{\partial \xi} = -\frac{1}{2}\frac{\partial^2 u_1}{\partial \tau^2} - \kappa(u_2 + u_3) - |u_1|^2 u_1 \qquad (5.1a)$$

$$i\frac{\partial u_2}{\partial \xi} = -\frac{1}{2}\frac{\partial^2 u_2}{\partial \tau^2} - \kappa(u_1 + u_3) - |u_2|^2 u_2 \qquad (5.1b)$$

$$i\frac{\partial u_3}{\partial \xi} = -\frac{1}{2}\frac{\partial^2 u_3}{\partial \tau^2} - \kappa(u_1 + u_2) - |u_3|^2 u_3 \qquad (5.1c)$$

เมื่อ $u_i$ คือ องค์ประกอบนอมัลไรซ์ของเอนเวลลอปพัลส์ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ในคอร์เส้นใน (i=1), คอร์เส้นกลาง(i=2) และคอร์เส้นนอก(i=3)

$\xi$ คือ coordinate ของคอร์

$\tau$ คือ เวลาที่เคลื่อนที่ในกรอบอ้างอิงของความเร็วกลุ่ม

$\kappa$ คือ สัมประสิทธิ์ในการคัปปลิ้งเชิงเส้น ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นกับระยะห่างระหว่างการคัปปลิ้ง และค่าการส่งสัญญาณที่กำหนดเป็นฟังก์ชันของพีคกำลังงานอินพุท $P_{max}$ ที่สอดคล้องกับการคัปเปลอร์ในรูปที่ 5.1 สามารถคำนวณผลได้ด้วยการให้สภาวะเริ่มต้นของ$\kappa$ =1 และพิจารณาให้

$$u_1(\xi = 0, \tau) = \sqrt{P_{max}}\,\mathrm{sech}(\tau) \qquad (5.2a)$$

$$u_2(\xi = 0, \tau) = u_3(\xi = 0, \tau) = 0 \qquad (5.2b)$$

ค่าการส่งผ่านสัญญาในแต่ละคอร์ได้คำนวณเป็นเหมือนการกระตุ้นพลังงานที่คอร์ และการคำนวณได้ทำภายในระยะทางที่เป็นครึ่งหนึ่งของ 2π (half-beat-length) โดย

$$L = \pi/2\kappa \qquad \text{กรณี 2-core}$$

$$L = \pi/\sqrt{2}\,\kappa \qquad \text{กรณี 3-core}$$

## 5.3 การสวิทช์ของโซลิตอนทางแสงในการคัปเปลอร์เส้นใยนำแสงแบบ 2 คอร์ (All-optical soliton switching in dual-core fiber coupler)

ในการคัปเปลอร์เส้นใยนำแสงแบบ 2 คอร์ ได้ใช้หลักของสมการโชร์ดิงเจอร์แบบไม่เชิงเส้นจากสมการที่ 5.1a และ 5.1b โดยกำหนดให้ $u_3$=0 จะได้ระบบของการคัปเปลอร์ของ $u_1$ และ $u_2$ เป็น

$$-i\frac{\partial u_1}{\partial \xi} \pm \frac{1}{2}\frac{\partial^2 u_1}{\partial \tau^2} = \kappa u_2 + |u_1|^2 u_1 \qquad (5.3a)$$

$$-i\frac{\partial u_2}{\partial \xi} \pm \frac{1}{2}\frac{\partial^2 u_2}{\partial \tau^2} = \kappa u_1 + |u_2|^2 u_2 \qquad (5.3b)$$

สมการ 5.3a และ 5.3b สามารถใช้อธิบายสภาวะที่เกิดการคัปปลิ้งเนื่องจากการหมดไปของสนามที่เกิดจากการเหลื่อมกันของพัลส์ในระหว่างอยู่ภายในคอร์ และในส่วนของการแพร่ที่ไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้มีการคัปปลิ้งกันจะได้รับอิทธิพลจากสมการ NLS เท่านั้น และสัมประสิทธิ์ในการคัปปลิ้ง $\kappa$ ควรจะมีค่าคงที่กับสเปกตรัมของพัลส์ความถี่

ในการจำลอง,อินพุทโซลิตอนได้ถูกป้อนเข้าไปเพียง 1 ทางของ 2 อินพุทพอร์ท ดังนั้น

$$u_1(\xi = 0, \tau) = u_0 \text{sech}(\tau/\tau_0)$$

$$u_2(\xi = 0, \tau) = 0$$

ลักษณะนี้ได้แสดงว่า เมื่อไรก็ตามที่ $u_0$ น้อยกว่าแอมพลิจูดที่ใช้ในการสวิทช์ พัลส์อินพุทที่เข้ามาจะถูกส่งข้ามไปยังช่องสัญญาณที่คัปเปิ้ลกันอยู่อย่างต่อเนื่อง โดยมีความผิดเพี้ยนรูปร่างของพัลส์ที่ค่อนข้างน้อย จนกระทั่ง $u_0$ มีค่ามากกว่าแอมพลิจูดที่ใช้ในการสวิทช์ การข้ามผ่านช่องสัญญาณจะไม่เกิดขึ้นเมื่อกำลังงานอินพุทมีค่าสูงกว่ากำลังงานที่ใช้ในการสวิทช์

**ผลและการอภิปราย**

**รูป** 5.3.1: แสดงค่าการทะลุผ่านกับพีคของกำลังงานอินพุทในการสวิทช์ ภายใต้อิทธิพลของการกระจายแบบปกติและไม่ปกติ

จากรูปแสดงการกระจายแบบปกติและการกระจายแบบไม่ปกติ โดยการกระจายแบบปกติจะมีค่าการส่งผ่านพลังงานเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังงานอินพุทเพิ่มขึ้น ดังนั้นยิ่งต้องการให้มีค่าการส่งผ่านพลังงานสูงก็ยิ่งต้องใช้กำลังงานอินพุทที่สูงขึ้นตามลำดับ ซึ่งหมายถึง แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ต้องมีกำลังงานสูง

ในขณะที่ การกระจายแบบไม่ปกติ จะเกิดการส่งผ่านพลังงานสูงสุดที่ค่ากำลังงานค่าหนึ่งโดยไม่ต้องทำการเพิ่มกำลังงานอินพุทแต่อย่างไร เพียงแต่เลือกใช้กำลังงานอินพุทที่เหมาะสมก็จะได้รับกำลังงานสูงสุดในการส่งผ่าน ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของการกระจายแบบไม่ปกติ อีกทั้งยังเป็นการประหยัดกำลังงานในการใช้แหล่งกำเนิดแสงพลังงานต่ำ

สรุปได้ว่า อิทธิพลของการกระจายแบบปกตินำไปสู่การสูญเสียคุณลักษณะในการสวิทช์ของคลื่นต่อเนื่อง ในขณะที่อิทธิพลของการกระจายแบบไม่ปกติให้ลักษณะของการสวิทช์ที่แน่นอนด้วยพลังงานอินพุทค่าหนึ่ง และจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อพลังงานในการสวิทช์เพิ่มขึ้น

**รูป** 5.3.2: แสดงการส่งผ่านสัญญาณของคอร์กับฟังก์ชันของพีคกำลังงานอินพุท $P_{max}$ ในการคัปเปลอร์แบบ 2 คอร์ด้วยระยะทาง half-beat-length

---

***หมายเหตุ*** : รูปจากข้อมูลจำลองแสดงไว้ในส่วนท้ายของบท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปแสดงการสวิทช์ของการคัปเปลอร์ด้วยเส้นใยนำแสงชนิด passive (อัตราขยายเป็นศูนย์) ทั้งคู่ ดังนั้นผลของการคัปปลิ้งจึงมีค่าในการส่งผ่านกำลังงานเท่ากัน กราฟจึงมีลักษณะสมมาตรกันทุก ๆ ตำแหน่ง จุดที่มีการสวิทช์ให้ค่าในการส่งผ่านเป็น 50% ด้วยค่ากำลังงานที่ใช้ในการสวิทช์เป็น 3.8 ขณะที่กำลังงานอินพุทสูงสุด ($P_{max}$) มีค่าเป็น 4

จากกราฟเป็นไปตามเหตุผลที่ว่า เมื่อกำลังงานอินพุทน้อยกว่ากำลังงานที่ใช้ในการสวิทช์ก็จะเกิดการส่งผ่านพลังงานไปยังอีกช่องสัญาณ จนกระทั่งถึงจุดที่มีพลังงานสูงสุดก็จะไม่เกิดการส่งกำลังงานข้ามช่องสัญญาณอีกต่อไป ดังนั้นค่าในการส่งผ่านพลังงานจึงมีค่าลดลงตั้งแต่จุด $P_{\max}$ เป็นต้นไป

**รูป 5.3.3:** แสดงการสวิทช์ใน active nonlinear dual-core fiber coupler ด้วยค่าที่แตกต่างกันของสัมประสิทธิ์ของอัตราขยายเชิงเส้น $\Gamma$ = 0.05, 0.1, 0.15 และ 0.2

จากรูป 5.3.3 ได้อาศัยสมการ NLS ได้ยืนยันการจำลองทางตัวเลขของระบบที่คัปปลิ้งอัตราขยายค่าต่าง ๆ พบว่า คุณลักษณะในการสวิทช์ของโซลิตอนในการคัปเปลอร์เส้นใยนำแสงชนิด active ที่มีสัมประสิทธิ์ของอัตราขยายต่างกัน ได้ให้กำลังงานที่ใช้ในการสวิทช์ลดลง จนกระทั่งอัตราขยายได้เพิ่มขึ้นไปที่ประมาณ $\Gamma$=0.15 และแม้แต่ที่ $\Gamma$=0.2 กราฟจะคล้ายกับ step function ลักษณะกราฟเช่นนี้เกิดขึ้นจากการที่ อัตราขยายตกอยู่ในช่วงของกำลังงานอินพุทที่ให้การเลื่อนเฟสที่กว้างขึ้นกว่าในกรณี passive ซึ่งเป็นผลของการอัดของกราฟไปตามแกน $P_0$ และทำให้ความชันของกราฟจากการสวิทช์มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงการสวิทช์ที่ดีขึ้น

เพราะฉะนั้นจากสัมประสิทธิ์ของอัตราขยายเชิงเส้น ($\Gamma$) จะเป็นตัวบอกจุดของการสวิทช์ที่ตอบสนองกับการสวิทช์ทางแสงด้วยความชันเป็นเส้นตรง อีกทั้งอัตราขยายที่ต่ำลงของกำลังงานในการสวิทช์ทำให้การตอบสนองของอุปกรณ์ดีขึ้น

## 5.4 การสวิทช์ของโซลิตอนในการคัปเปลอร์เส้นใยนำแสงแบบ 3 คอร์ (Soliton switching in active three-core nonlinear fiber couplers)

การคัปเปลอร์แบบ 3 คอร์ ได้เป็นที่สนใจในขณะนี้เนื่องจากคุณสมบัติเด่นที่สำคัญคือ ให้การสวิทช์ที่คมชัดกว่าการคัปเปลอร์แบบ 2 คอร์ แต่ข้อเสียเปรียบประการสำคัญ คือการสวิทช์เกิดขึ้นบนช่วงกำลังงานที่ค่อนข้างกว้าง และกำลังงานที่ใช้ในการสวิทช์สูงขึ้น

ในการคัปเปลอร์แบบ 3 คอร์ ให้การแพร่ของพัลส์โซลิตอนที่มีขนาด ps ไปยังเส้นใยนำแสงที่คัปปลิ้งข้างเคียง ด้วยอัตราขยายและแบนด์วิดธ์ไม่จำกัด เหล่านี้สามารถทำนายได้ด้วยการแก้สมการ NLS ในระบบแบบ 3 คอร์

$$i\frac{\partial u_1}{\partial \xi} = -\frac{1}{2}\frac{\partial^2 u_1}{\partial \tau^2} - \kappa(u_2 + u_3) - |u_1|^2 u_1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i\frac{\partial u_2}{\partial \xi} = -\frac{1}{2}\frac{\partial^2 u_2}{\partial \tau^2} - \kappa(u_1 + u_3) - |u_2|^2 u_2 \qquad (5.4)$$

$$i\frac{\partial u_3}{\partial \xi} = -\frac{1}{2}\frac{\partial^2 u_3}{\partial \tau^2} - \kappa(u_1 + u_2) - |u_3|^2 u_3$$

สำหรับการคำนวณในที่นี้ ในแต่ละกรณีของสภาวะเริ่มต้นที่สอดคล้องกับการกระตุ้นที่ขอบของการคัปเปลอร์ ได้พิจารณาให้เป็นไปตามสมการ 5.4 ด้วยระยะทาง half-beat-length เป็น $L = \pi/\sqrt{2}\,\kappa$ เมื่อ $\kappa$ = 1 ที่สภาวะเริ่มต้น

**ผลและการอภิปราย**

**รูป 5.4.1 :** แสดงการคัปเปลอร์ของเส้นใยนำแสงแบบ 3 คอร์

จากรูปพบว่า พลังงานในการส่งผ่านสัญญาณมีอยู่ 2 ค่า คือค่าระหว่างคอร์ 1 กับ 2 และระหว่างคอร์ 2 กับ 3 และในการเลือกจุดทำงานจะพิจารณาจุดที่ให้เฟสคมชัดที่สุด คือจุดทำงานระหว่างคอร์ 1 กับ 2

**รูป 5.4.2 (a),(b) และ (c):** แสดงค่าการทะลุผ่านในฟังก์ชันของพีคกำลังงานอินพุท $P_{max}$ ด้วยสัมประสิทธิ์อัตราขยายที่มีค่าแตกต่างกันในคอร์ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างการคัปเปลอร์กรณี 2 คอร์และ 3 คอร์ จากกรณีของการคัปเปลอร์แบบ 2 คอร์ด้วยเส้นใยนำแสงชนิด active พบว่าผลของสัมประสิทธิ์อัตราขยายที่ต่ำลง ให้กำลังงานในการสวิทช์ดีขึ้น และให้กราฟของการส่งสัญญาณคมชัดขึ้น

สำหรับการคัปเปลอร์แบบ 3 คอร์ด้วยเส้นใยนำแสงชนิด active ที่มีสัมประสิทธิ์อัตราขยายเป็น 0.2 สามารถทำได้ด้วยการใช้เส้นใยนำแสงที่โดปด้วยเออร์เบียม ซึ่งให้ผลของการสวิทช์ที่พีคกำลังงานอินพุทประมาณ $P_{max}$=3 เปรียบเทียบกับ $P_{max}$=4 สำหรับ passive 3-core fiber coupler (รูป 5.4.2 และรูป 5.4.1) อีกทั้งในการแสดงของอัตราขยายมีความเป็นไปได้ที่จะได้รับกำลังงาน 80% ส่งผ่านในจุดศูนย์กลางของคอร์ ส่วน passive coupler ให้ค่าการส่งผ่านน้อยกว่า 60% (ดังรูป 5.4.2b)

เมื่อกำลังงานสูงขึ้นจะเกิด transient ขึ้น เนื่องจากพลังงานมีการ swap อย่างรุนแรงระหว่างจุดศูนย์กลางคอร์ (i=2) และ outer core (i=3)

**รูป 5.4.3 :** แสดงการสวิทช์ด้วยอัตราขยายภายในคอร์ต่างกัน ด้วย G=0 และ G=0.2 ตามลำดับ

จากสภาวะความไม่เป็นเชิงเส้นและการคัปปลิ้งเชิงเส้นนำไปสู่อิทธิพลคล้ายคลึงกับระบบการออสซิลเลทความถี่ เมื่อกำลังงานอินพุทสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 5.4.3 แสดงกราฟของการส่งสัญญาณกับกำลังงาน เมื่อสัมประสิทธิ์ของอัตราขยายแตกต่างกัน จะพบว่าการคัปเปลอร์ด้วยเส้นใยนำแสงชนิด active จะทำให้เกิด transient ขึ้น เป็นเหตุให้เกิดความไม่เสถียรภาพของการสวิทช์ขึ้น เนื่องจากไม่สามารถหาจุดสวิทช์ที่เหมาะสมได้

ดังนั้นการคำนวณทางตัวเลขที่แสดงลักษณะการส่งสัญญาณของการคัปเปลอร์แบบ 3 คอร์ สำหรับพัลส์ของโซลิตอนได้แสดงพฤติกรรมในการสวิทช์ที่คมชัดเปรียบเทียบการคัปเปลอร์แบบ 3 คอร์ใน passive ซึ่งจำเป็นต้องมีความเข้าใจในอัตราขยายของตัวกลาง และการสวิทช์ที่กำลังงานต่ำลงอาจจะมีความเป็นไปได้ ดังนั้นการเสนอผลที่ได้รับจึงเป็นไปได้สำหรับการสวิทช์ด้วยการใช้กำลังงานต่ำมาก

## 5.5 การกำเนิดของโซลิตอนในช่องคู่สัญญาณของ mode-locked fiber laser (Soliton generation in a dual-channel mode-locked fiber laser)

ในระบบการสื่อสารที่ต้องการความเร็วสูงในการส่งข้อมูลนั้น สิ่งจำเป็นอย่างหนึ่งเพื่อให้กำเนิดพัลส์ความเร็วสูงด้วยบิทจำนวนมาก นั่นคือ แหล่งกำเนิดแสง ในปัจจุบันแหล่งกำเนิดกำลังงานสูงที่ใช้ในการกำเนิดโซลิตอน คือ color center และ Nd:YAG เลเซอร์เป็นต้น แต่ในทางการปฏิบัติของระบบการสื่อสารมักใช้แหล่งกำเนิดโซลิตอนจากเลเซอร์ไดโอด หรืออาจใช้การกำเนิดพัลส์จาก gain switched เลเซอร์ไดโอด ร่วมกับเทคนิคการกรองเข้าช่วยในการกำเนิดพัลส์

ในงานนี้,การกำเนิดของขบวนพัลส์ เช่นโซลิตอนที่มีกำลังสูงนี้ได้ให้อัตราบิทสูง(GHz-THz) ซึ่งแสดงได้ด้วยการวิเคราะห์ทางตัวเลข ด้วยหลักการพื้นฐานอยู่บนการแพร่ในการไปกลับด้วยคู่ความถี่ของคลื่นต่อเนื่องจากการมอดดูเลทสัญญาณไซน์ผ่าน passive-mode-locked fiber ด้วยสัญญาณเอาท์พุท 2 ทาง

คู่ของช่องสัญญาณใน active NLDC ถูกจัดการใช้งานในความยาว half-beat length ของการคัปเปลอร์ด้วยเออร์เบียมแบบ 3 คอร์ ด้วยมีช่องสัญญาณเอาท์พุทออก 2 ทาง กับอัตราขยายที่พอดีกับอัตราการป้อนกลับของกระจก ขณะที่แขนตรงกลางเป็น passive คอร์

การอธิบายทางคณิตศาสตร์ในการทำงาน ใช้ระบบในการคัปเปิ้ลแบบ 3 คอร์ของสมการ NLS โดย

$$
\begin{aligned}
&i\frac{\partial u}{\partial \xi}+\frac{1}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2}+\kappa v+|u|^2 u=i\frac{1}{2}gL_D\left[u+\tau_2^2\frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2}\right]\\
&i\frac{\partial v}{\partial \xi}+\frac{1}{2}\frac{\partial^2 v}{\partial \tau^2}+\kappa(u+w)+|v|^2 v=0\\
&i\frac{\partial w}{\partial \xi}+\frac{1}{2}\frac{\partial^2 w}{\partial \tau^2}+\kappa v+|w|^2 w=i\frac{1}{2}gL_D\left[w+\tau_2^2\frac{\partial^2 w}{\partial \tau^2}\right]
\end{aligned}
\qquad (5.5)
$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $u$ และ $v$ คือ สนามแอมพลิจูดใน outer passive core

$L_D$ คือ ระยะทางในการกระจาย

$\tau_2$ คือ อัตราขยายแบนด์วิดธ์

$g$ คือ อัตราขยายอิ่มตัว; $g = g_0 \exp(-E_P/E_{sat})$ โดยที่ $g_0$ คือ สัมประสิทธิ์ของอัตราขยายที่ไม่อิ่มตัว, $E_P$ คือ กำลังงานของพัลส์ และ $E_{sat}$ คือ พารามิเตอร์ของการอิ่มตัว

**ผลและการอภิปราย**

**รูป 5.5.1:** แสดงการพัฒนาของพัลส์เริ่มต้นเหมือน sech พัลส์ที่พีคความเข้มมีค่า 2.0 หลังจากการเดินทางไปกลับได้ 2 รอบ

(a) และ (b) แสดงความเข้มใน active core $|u|^2$, $|w|^2$ ที่เกี่ยวข้องกับ steady-state ของพัลส์หลังจากเดินทางไปกลับได้ 2 รอบ

(c) แสดงความเข้มใน passive core $|v|^2$

จากรูปแสดงการเปลี่ยนแปลงของพัลส์เริ่มต้นด้วย $u_0$=2 ผ่านการเดินทางไปกลับ 3 รอบ เนื่องจาก $u_0$=2 เป็นโซลิตอนในอันดับสูงของสมการ NLS จึงเป็นไปได้ว่าพัลส์จะมีการอัดตัวด้วยตนเองก่อน และในขณะที่พัลส์อัดตัวก็จะมีการปรับปรุงพัลส์ความเข้มต่ำที่บริเวณฐานและปีกของพัลส์ ให้ข้ามไปยัง passive core ในรูปความเข้ม $|v^2|$ ด้วยการกระทำผ่านทาง directional coupler แบบเชิงเส้น ส่วนความเข้มตรงศูนย์กลางของพัลส์จะยังคงอยู่ภายใน active core เมื่อมีการกลับไปกลับมาของพัลส์จะทำให้เกิดการสมดุลของการอัดและการขยายโซลิตอน และการสูญเสียที่อิ่มตัวได้ให้ steady-state ของพัลส์มีขนาดสั้นมาก

**รูป 5.5.2** แสดงการเปลี่ยนแปลงของคาบเวลาในรูปของขบวนพัลส์ในเลเซอร์ (คาบ T=2, $u_0$=2 )

**รูป 5.5.3** แสดงสเปกตรัมของพัลส์หลังจากเดินทางไปได้ 3 รอบ

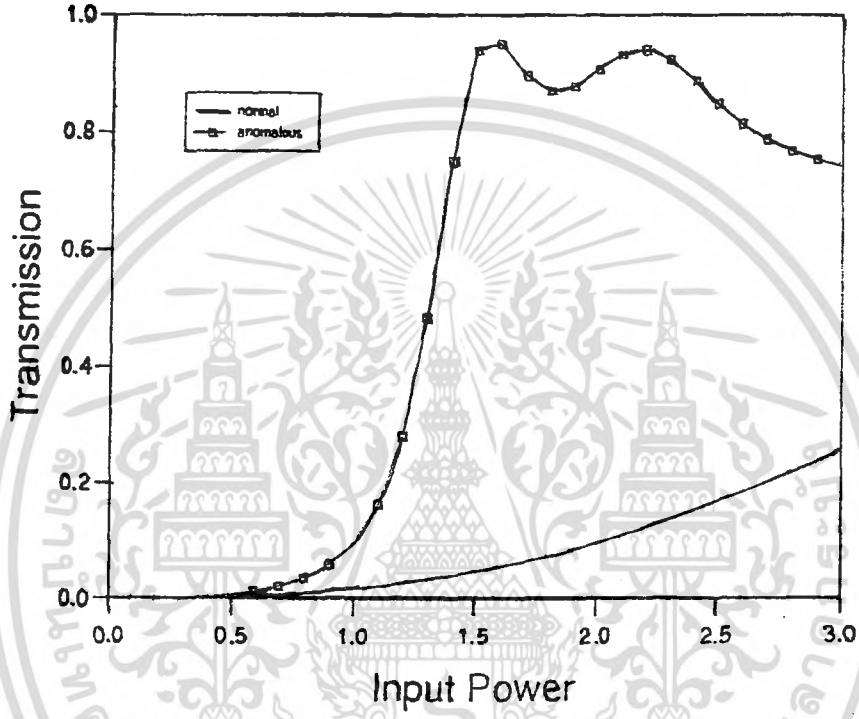
ในการจัดการจำลองแบบ ได้ส่งพัลส์เริ่มต้นเข้าไปในเส้นใยนำแสงชนิด active ให้อยู่ในรูป sech $(u(\xi = 0, t) = w(\xi = 0, t) = u_0 \operatorname{sech}(\tau))$ การรวมกันของความไม่เป็นเชิงเส้น,การกระจาย และผลของการขยายแบบซ้ำไปซ้ำมาบนส่วนที่มีการแยกกันของความเข้มสูงของสัญญาณคู่ความถี่ในการมอดดูเลทสัญญาณรูปไซน์ $(u(\xi = 0, t) = w(\xi = 0, t) = u_0 \sin(\pi\tau/T))$ ทำให้เกิดการสร้างองค์ประกอบของสเปกตรัมใหม่ขึ้นมาและกลับคืนสู่รูปร่างเดิมภายในขบวนพัลส์ที่มีการกำจัดการกระจายออกของพัลส์ ดังรูป 5.5.2 และ 5.5.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปได้ว่า การแสดงการจำลองรูปแบบในการจัดรูปใหม่ของพัลส์สัญญาณคู่ความถี่รูปไซน์ เกิดขึ้นในช่วงที่มีการแยกตัวออกจากพัลส์โซลิตอนพื้นฐานในช่องคู่สัญญาณใน mode-locked fiber laser

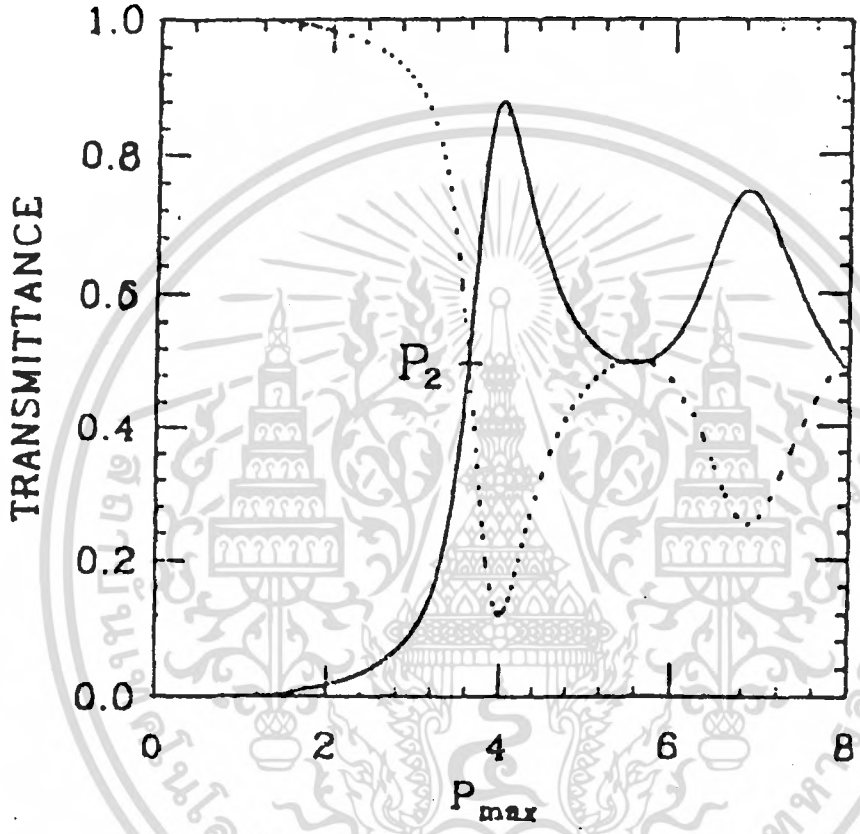
ระดับความเป็นอิสระ(degree of freedom) ที่พิเศษ เป็นผลมาจากการคัปเปลอร์แบบ 3 คอร์ (อินพุท 1 ช่องทางและเอาท์พุท 2 ช่องทาง) ในเส้นใยนำแสงที่โดปด้วยเออร์เบียม ซึ่งมีประโยชน์อย่างยิ่งต่อระบบวงจรเปรียบเทียบในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



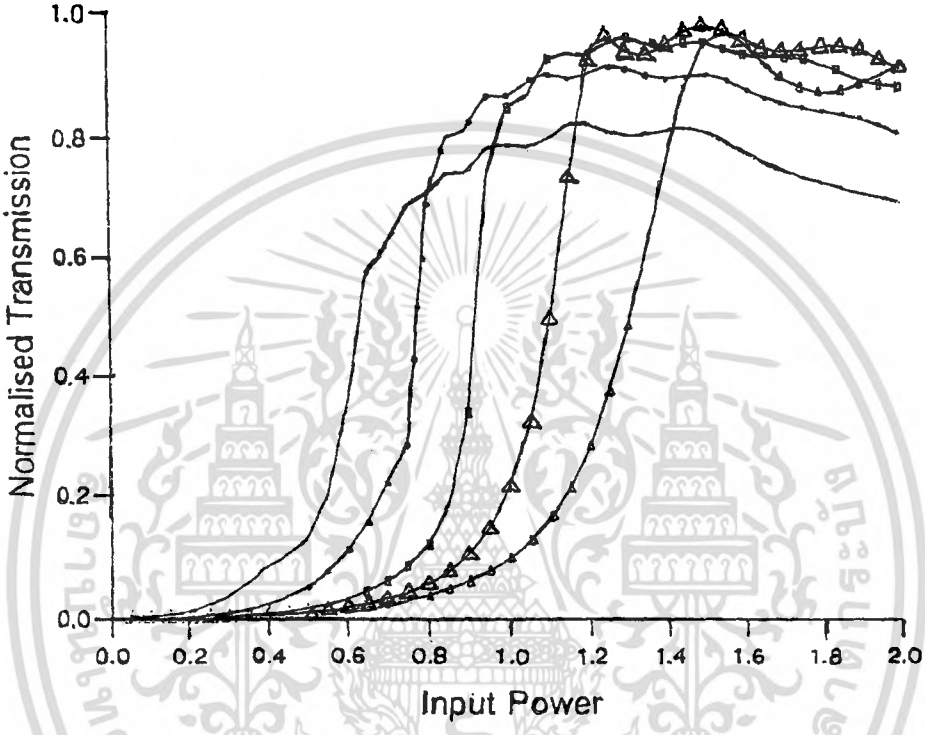

**รูปที่ 5.3.1: แสดงค่าการทะลุผ่านกับพีคของกำลังงานอินพุทในการสวิทช์ ภายใต้อิทธิพลของการกระจายแบบปกติและไม่ปกติ**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



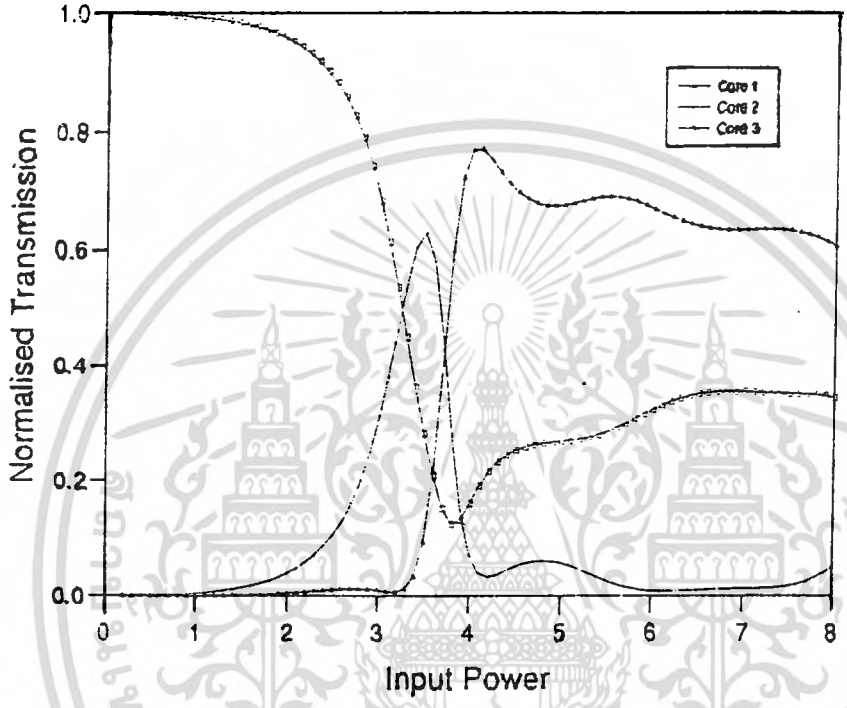

**รูปที่ 5.3.2: แสดงการส่งผ่านสัญญาณของคอร์กับฟังก์ชันของพีคกำลังงานอินพุทในการคัปเปลอร์แบบ 2 คอร์**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



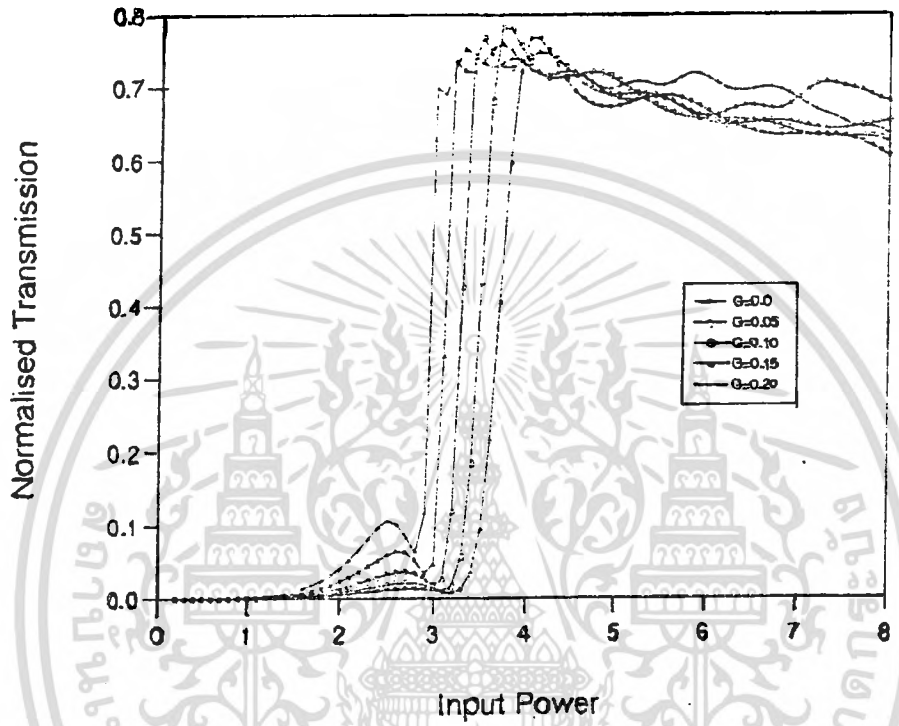

**รูปที่ 5.3.3: แสดงการสวิทช์ใน active nonlinear dual-core fiber coupler ด้วยค่าที่แตกต่างกันของสัมประสิทธิ์ของอัตราขยายเชิงเส้น $\Gamma$ = 0, 0.05, 0.1, 0.15,และ 0.2 (เรียงลำดับกราฟจากขวาไปซ้าย)**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



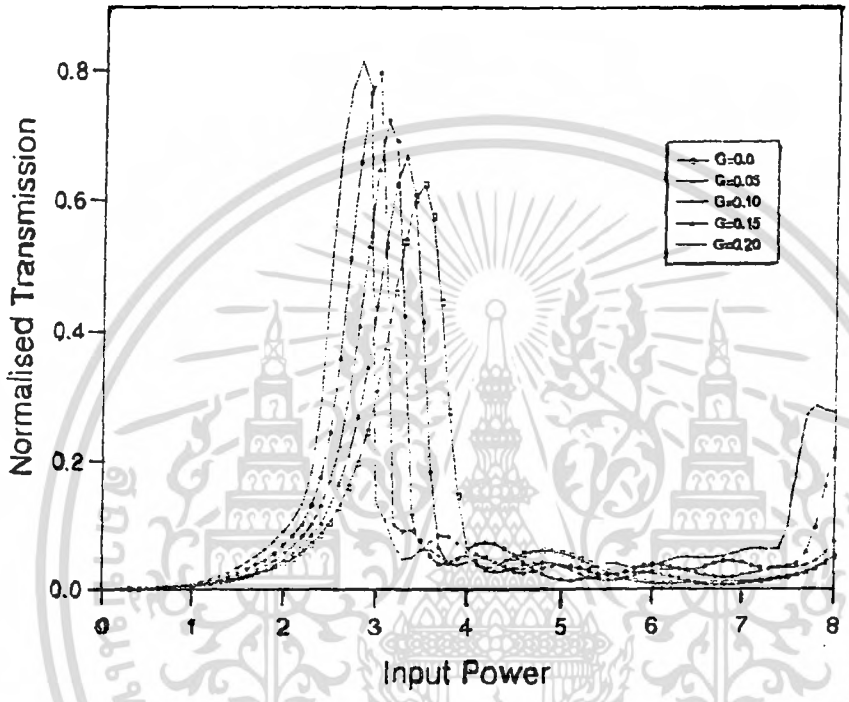

**รูปที่ 5.4.1 : แสดงการส่งผ่านสัญญาณของคอร์กับฟังก์ชันของพีคกำลังงานอินพุทในการคัปเปลอร์ของเส้นใยนำแสงแบบ 3 คอร์**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



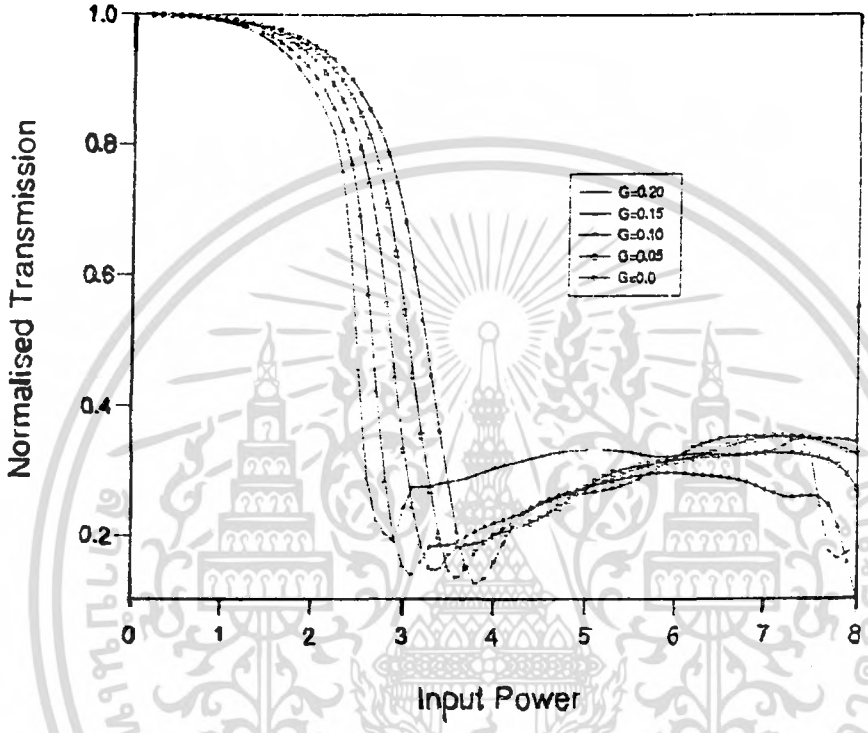

**รูปที่ 5.4.2 (a): แสดงค่าการทะลุผ่านในฟังก์ชันของพีคกำลังงานอินพุทด้วยค่าที่ต่างกันของสัมประสิทธิ์อัตราขยายในคอร์ที่ 1**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



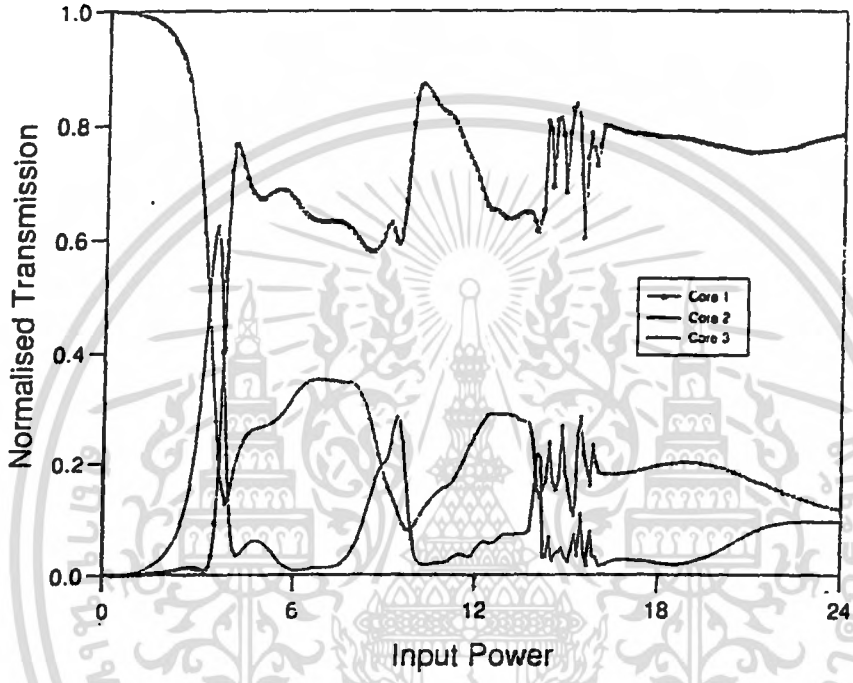

**รูปที่ 5.4.2 (b): แสดงค่าการทะลุผ่านในฟังก์ชันของพีคกำลังงานอินพุทด้วยค่าที่ต่างกันของสัมประสิทธิ์อัตราขยายในคอร์ที่ 2**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



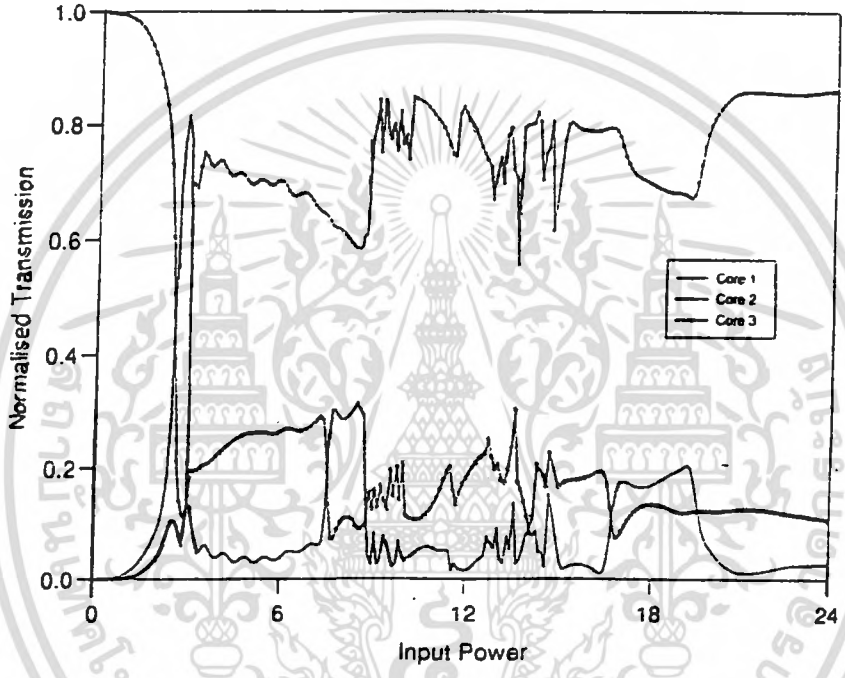

**รูปที่** 5.4.2 (c): **แสดงค่าการทะลุผ่านในฟังก์ชันของพีคกำลังงานอินพุทด้วยค่าที่ต่างกันของสัมประสิทธิ์อัตราขยายในคอร์ที่** 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



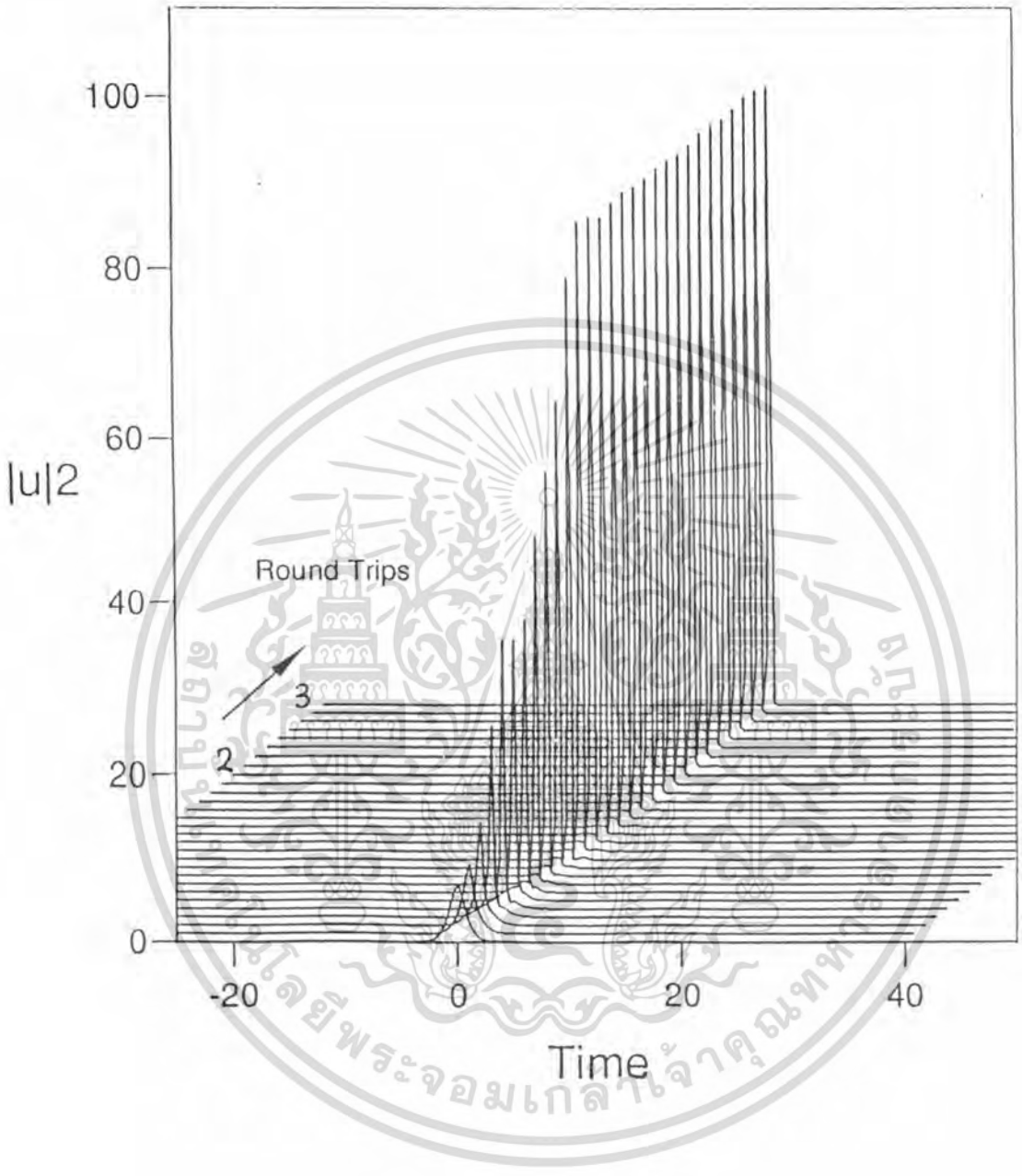

**รูปที่ 5.4.3 (a): แสดงสัญญาณในช่วงกำลังงานสูงจากการคัปเปลอร์ด้วย passive core (G=0)**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



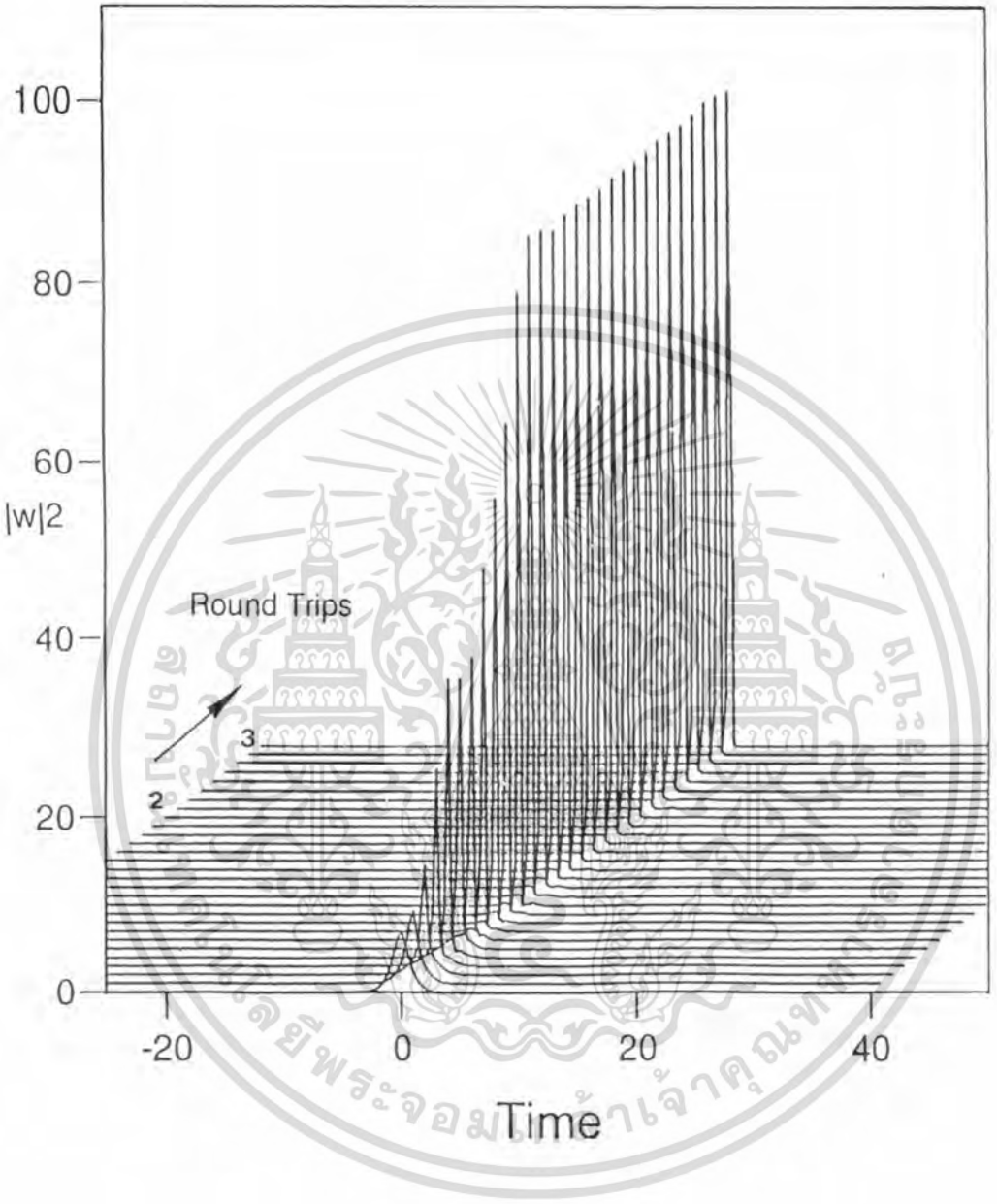

**รูปที่ 5.4.3 (b): แสดงสัญญาณในช่วงกำลังงานสูงจากการคัปเปลอร์ด้วย active core (G=0.2)**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



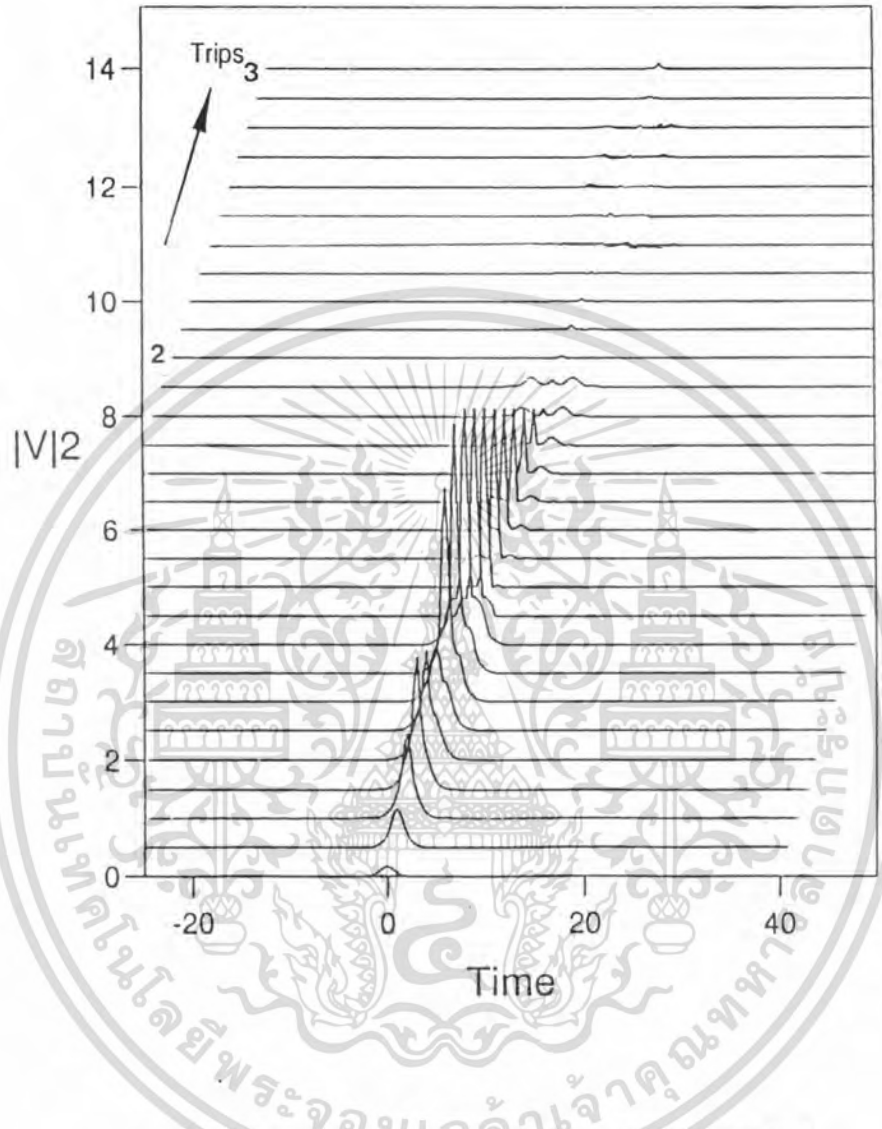

**รูปที่ 5.5.1(a): แสดงความเข้มใน active core $|u|^2$ ที่เกี่ยวข้องกับ steady-state ภายในพัลส์หลังจากเดินทางไปกลับได้ 2 รอบ**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



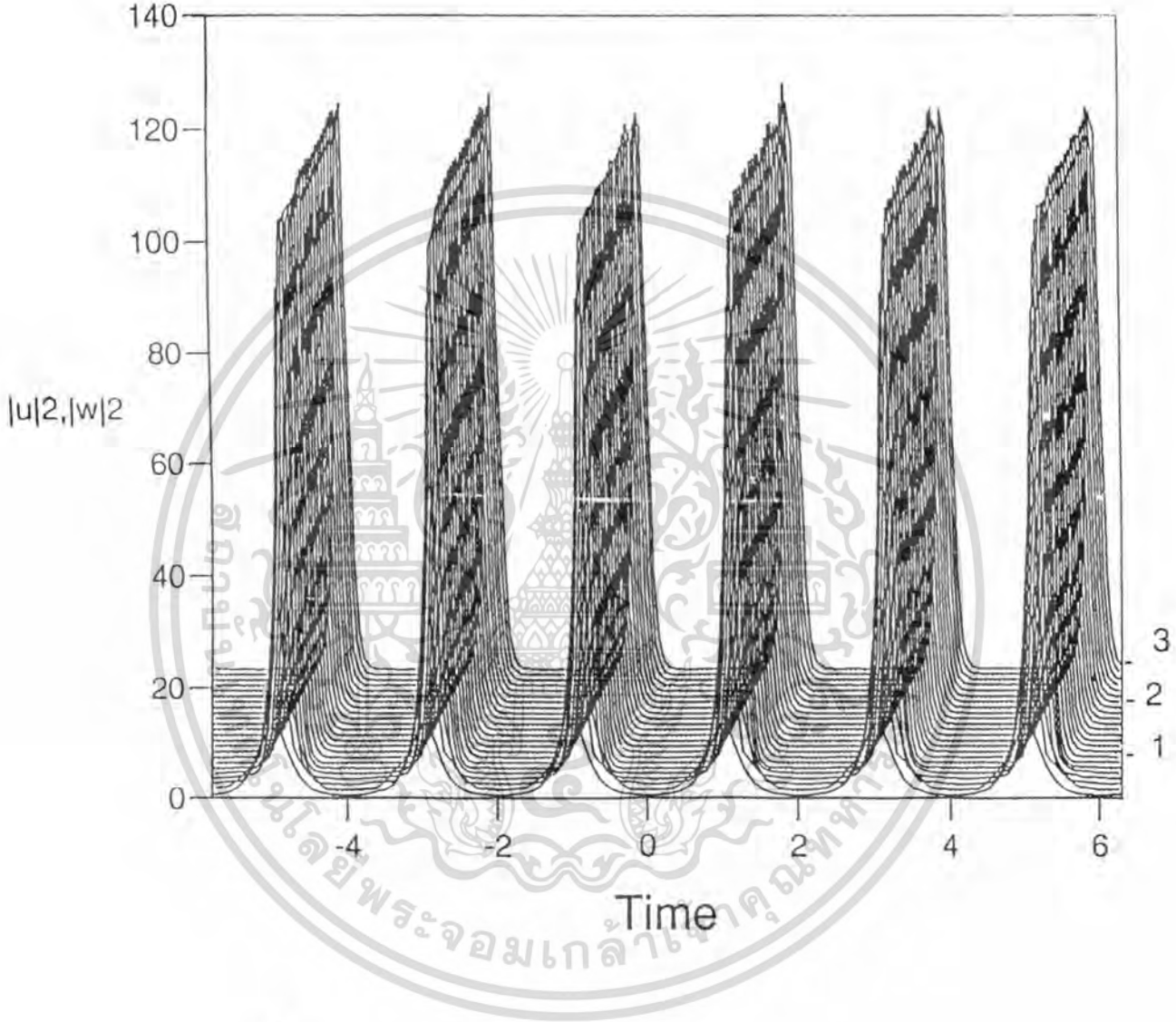

**รูปที่ 5.5.1(b): แสดงความเข้มใน active core $|w|^2$ ที่เกี่ยวข้องกับ steady-state ภายใน พัลส์หลังจากเดินทางไปกลับได้ 2 รอบ**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



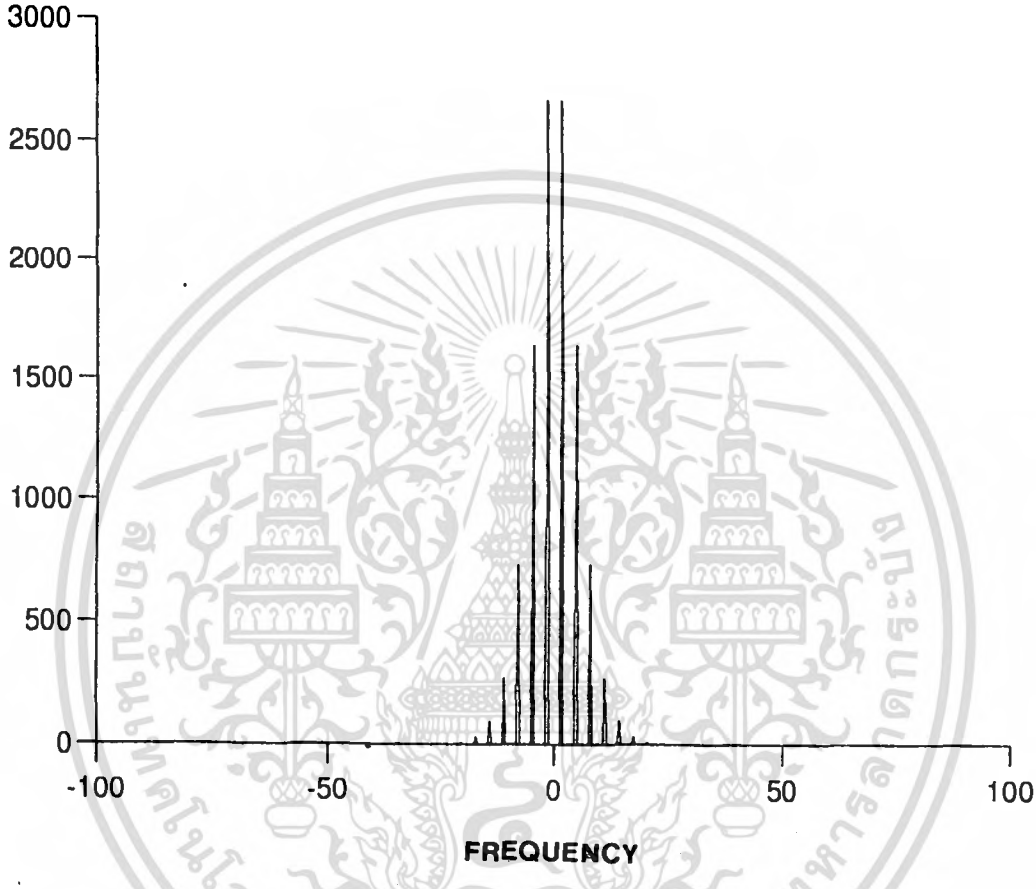

**รูปที่ 5.5.1(c): แสดงความเข้มใน passive core $|v|^2$**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 5.5.2: แสดงการพัฒนาคาบเวลาของรูปแบบของขบวนพัลส์ในเลเซอร์**
**(คาบ T=2, $u_0$=2)**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 5.5.3: แสดงสเปกตรัมของพัลส์หลังจากเดินทางไปได้ 3 รอบ**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# เอกสารอ้างอิง

Agrawal,G.P. in FIBER OPTIC COMMUNICATION SYSTEMS. Microwave & Optical Engineer series, pp. 391-423, JOHN WILEY & SONS, Singapore, 1992.

Basch,E.E. in Optical-Fiber Transmission. pp. 219-222, SAMS, Indianapolis, IN, 1987.

Bauh,P.A. and Yupapin,P.P. "Optical Soliton Communication" Ph.D. Thesis, City University, 1995.

Hasagawa,A. and Kodama,Y. in Solitons in Optical Communications. pp. 7-23,36-42, University Press, Great Britain, 1992.

Hecht,J. in Understanding Fiber Optics. Sams, Indiana, 1987.

Islam,M.N. in Ultrafast Fiber Switching Devices and Systems. pp. 1-102, Cambridge University Press, Great Britain, 1992.

Miller,S.E. in Optical Fiber Telecommunication III. pp. 90-98, Academic Press; San Diego, 1979.

Newell,A.C. and Moloney,J.V. in Nonlinear Optics. ATIMS, California, 1992.

Romagnoli,M., Trillo,S. and Wabnitz,S. "Soliton switching in nonlinear couplers" Optical and Quantum Electronics. 24(1992): s1243-1245.

Soto-Crespo,J.M. and Wrigth.E.M. "All-optical switching of soliton in two- and three-core nonlinear fiber couplers" Appl. Phys. 70(12).(1991):7240-7243.

Winful,H.G. and Walton,D.T. "Passive mode locking through nonlinear coupling in a dual-core fiber laser" Optics Letters. 17,23(1992):1688-1690.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ก.

# คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเส้นใยนำแสงไดอิเลคทริค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเส้นใยนำแสงไดอิเลคทริค

เนื่องจากโซลิตอนเชิงแสงสามารถแสดงความเสถียรภาพของเอนเวลลอปพัลส์(envelope pulse) แบบไม่เชิงเส้นของคลื่นแสงอาพันธ์ (coherent) ได้ ดังนั้นการศึกษาของเอนเวลลอปฟังก์ชันเชิงซ้อนในอวกาศทำโดยการพิจารณาจากแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้ายังผล $E(z,t)$ ที่มีการโพลาไรซ์เดี่ยวซึ่งแสดงได้ด้วยสมการ

$$i\frac{\partial E}{\partial z}+ik_1'\frac{\partial E}{\partial t}-\frac{1}{2}k_1''\frac{\partial^2 E}{\partial t^2}+\frac{\omega_1 n_2 g}{c}|E|^2E=-i\gamma E+i\frac{1}{6}k_1'''\frac{\partial^3 E}{\partial t^3}+i\beta\frac{\partial\left(|E|^2E\right)}{\partial t}+\sigma_R E\frac{\partial|E|^2}{\partial t}$$

ในที่นี้ $z$ คือ ระยะทางตามแกน : $t$ คือ เวลา

$\omega_1$ คือ ความถี่เชิงมุมของคลื่นพาหะของแสงอาพันธ์

$k_1'$ คือ $\partial k/\partial\omega$ ที่ $\omega=\omega_1$ ซึ่งเหมือนกับ $k_1''$ และ $k_1'''$ ที่เป็นอนุพันธ์อันดับที่ 2 และ 3 ของ $\partial k/\partial\omega$ ตามลำดับ

$n_2$ คือ สัมประสิทธิ์ของเคอร์ (Kerr coefficient) ของสารไดอิเลคทริค ในซิลิกาไฟเบอร์มีค่า = $1.3\times10^{-22}$ $m^2/N^2$

$\gamma$ คือ spatial damping rate ซึ่งเกิดจากการสูญเสียของไฟเบอร์

$\beta$ คือ สัมประสิทธิ์ของการกระจายแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear dispersion coefficient) ซึ่งเกิดจากคุณสมบัติของ $n_2$ ที่มีการกระจายเป็น $\partial n_2/\partial\omega$

$\sigma_R$ คือ สัมประสิทธิ์การกระจายของอัตราขยายของรามาน (Raman gain dispersion coefficient) ; $\partial g_R/\partial(\Delta\omega)$

$g_R$ คือ สัมประสิทธิ์ของอัตราขยายของรามาน

$\Delta\omega$ คือ ความแตกต่างกันระหว่างความถี่ของปัมพ์โหมด(pump mode) กับความถี่ของสโตก โหมด(stoke mode)

$g$ คือ reduction factor ของผลที่ไม่เชิงเส้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าในภาคตัดขวางของเส้นใยนำแสงโดย $g\approx1/2$

จากการพิจารณากลุ่มคลื่น (wave packet) ได้แสดงถึงความจริงที่ว่า ระยะทางในการแพร่วัดได้ด้วย foot step size ของคลื่น นั่นคือ ความยาวคลื่นแสงมีค่ามากมายแม้ว่าระยะทางที่ปรากฏมีค่าเพียงเล็กน้อย สำหรับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 1 $\mu$m แพร่ด้วยระยะทาง 1km สอดคล้องกับ $10^9$ step size ซึ่งสิ่งนี้เป็นเหตุผลที่ทำให้สัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ในสมการข้างต้น แม้เพียงค่าเปลี่ยนไปเล็กน้อยก็นับเป็นสิ่งสำคัญได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาโซลิตอนที่เป็นคำตอบของสมการข้างต้นทั้งหมดเมื่อเทอมข้างขวาเป็นศูนย์ โดยเทอมด้านขวาจะใช้สำหรับเปลี่ยนคำตอบของโซลิตอนไปเป็นชนิดต่าง ๆ และแสดงไว้เพื่อเป็นการแสดงคำตอบของโซลิตอนขณะที่เทอมเหล่านี้มีค่าน้อย ๆ และจากคุณสมบัติของโซลิตอนที่แปรผันกับสัมประสิทธิ์ของสมการข้างต้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต่อการเข้าใจที่มาของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสมการดังกล่าว

## ก. 1 คุณสมบัติเชิงเส้นของเส้นใยนำแสง

คุณสมบัติเชิงเส้นและคุณสมบัติการกระจายในเส้นใยนำแสงมีความสำคัญต่อการกำหนดเทอมของการสูญเสีย $\gamma$ ซึ่งจะได้อธิบายถึงคุณสมบัติเหล่านี้ คือ

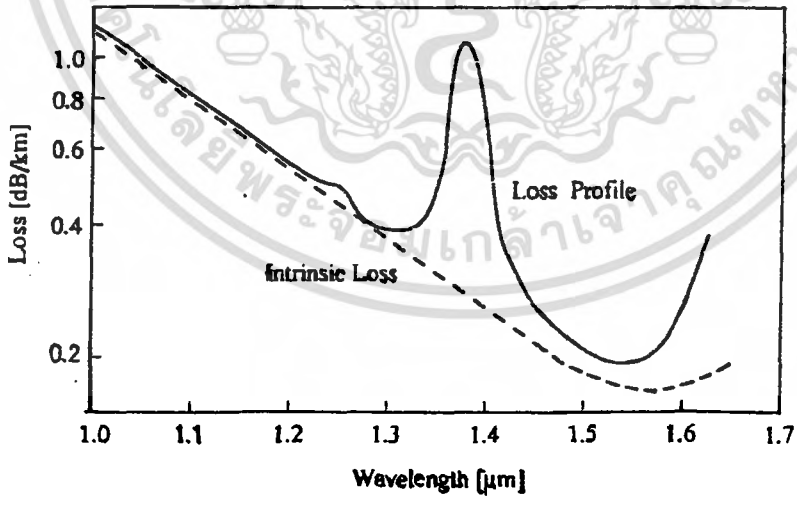
### 1. การสูญเสียของเส้นใยนำแสง *(fiber loss)*

ในระหว่างการเดินทางของคลื่นแสงในเส้นใยนำแสงนั้น พลังงานของแสงได้สูญเสียไปเนื่องจากการดูดกลืนหรือการกระเจิง การสูญเสียเกิดจากคุณสมบัติของสารองค์ประกอบในเส้นใยนำแสงเอง ซึ่งหาค่าได้จากส่วนจินตภาพของดัชนีหักเหเชิงเส้น $n_2(\omega)$ ที่สัมพันธ์กับ $\gamma$ ดังสมการ

$$\gamma = \frac{\omega_0}{c}\mathrm{Im}\{n_0\} \qquad \text{(ก.1)}$$

การสูญเสียมักแสดงด้วยพารามิเตอร์ที่อยู่ในเทอมของการสูญเสียกำลังงาน $\delta$ ในหน่วย dB/km ซึ่งสัมพันธ์กับ $\gamma$ คือ

$$\delta = -20\log(e^{-\gamma}) = 8.69\gamma \qquad \text{(ก.2)}$$




ก.1 : แสดงรูปแบบการสูญเสียที่วัดได้ (กราฟเส้นทึบ) ในเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว และการสูญเสียภายใน (กราฟเส้นประ) ที่มีผลมาจากการดูดกลืนภายในสาร และการกระเจิงของเรย์เลห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสูญเสียของเส้นใยนำแสงขึ้นกับความยาวคลื่นของแสงดังรูป ก.1 แสดงย่านการสูญเสียของเส้นใยนำแสงที่มีการสูญเสียต่ำ โดยทั่วไปการสูญเสียต่ำที่สุดอยู่ที่ค่าประมาณ 0.01dB/km ที่ความยาวคลื่น 1.55 $\mu$m และสาเหตุสำคัญที่สนับสนุนให้มีการดูดกลืนในสารและการกระเจิงของเรย์เลห์คือ

1.1 <u>การดูดกลืนในสาร</u>

เกิดขึ้นกับเส้นใยนำแสงชนิดซิลิกา ที่มีการดูดกลืนในย่านอุลตราไวโอเลทและย่านอินฟราเรดที่สูงกว่า 2 $\mu$m ขึ้นไป อย่างไรก็ตามในช่วงความยาวคลื่น 0.5-2 $\mu$m ก็อาจมีการดูดกลืนเกิดขึ้นแม้จะมีสารเจือปนอยู่เพียงเล็กน้อย สารเจือที่มีผลต่อการดูดกลืนเป็นส่วนใหญ่ คือ อิออนของไฮโดรเจน ($OH^-$) ซึ่งมีพีคการดูดกลืนของการสั่นพื้นฐานที่ความยาวคลื่นประมาณ 2.73 $\mu$m และ overtone ของพีคการดูดกลืนของไฮโดรเจนอิออนนี้สามารถตอบสนองกับพีคที่ครอบคลุมอยู่ในช่วงใกล้กับ 1.37 $\mu$m และพีคที่สั้นลงในบริเวณ 1.23 $\mu$m

1.2 <u>การกระเจิงของเรย์เลห์</u>

เป็นการสูญเสียพื้นฐานที่เกิดจากความหนาแน่นที่ไม่แน่นอนของสารประกอบภายในเส้นใยนำแสง เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหในแต่ละบริเวณไม่เท่ากัน ทำให้แสงกระเจิงในทิศทางที่ต่างกัน และจากที่การกระเจิงของเรย์เลห์เพิ่มขึ้นกับ $\lambda^{-4}$ ดังนั้นการสูญเสียนี้จึงมีอิทธิพลต่อความยาวคลื่นสั้น ซึ่งกำหนดได้ด้วยสมการ

$$\gamma_R = c/\lambda^{-4} \qquad \text{(ก.3)}$$

เมื่อค่าคงที่ $c$ อยู่ในช่วง 0.4-0.5 dB/(km.$\mu$m$^4$) ซึ่งมีค่าขึ้นกับองค์ประกอบภายใน core ของเส้นใยนำแสง โดยระดับการสูญเสียภายในแสดงได้ด้วยเส้นประในรูปที่ ก.1 ดังนั้น $\delta$ มีค่า 0.12-0.15 dB/km ที่ความยาวคลื่น 1.55 $\mu$m

**2. การกระจายภายในเนื้อสาร *(material dispersion)***

ถ้ากลุ่มคลื่นที่มีความเร็วกลุ่ม $v_g \left(=\partial\omega/\partial k = 1/k'\right)$ แพร่ด้วยความเร็วที่ต่างกัน จะทำให้เกิดการกระจายของกลุ่มคลื่น โดยการกระจายของความเร็วกลุ่มนี้เกิดมาจากคุณสมบัติของสารภายในเส้นใยนำแสงเอง

การกระจายภายในเนื้อสาร เกิดจากการดูดกลืนการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านการสั่นของพันธะอิเลคตรอน โดยปฏิกิริยาระหว่างสนามไฟฟ้าของคลื่นแสงกับพันธะอิเลคตรอน มีผลเนื่องมาจาก ดัชนีหักเหเชิงเส้น $n_0(\omega)$ แปรผันกับความถี่แสง $\omega$ และสิ่งที่เป็นปัจจัยหลักให้เกิดการกระจายในสารคือ ความถี่เรโซแนนซ์ อย่างไรก็ตามการดูดกลืนจะมีอิทธิพลมากกว่าการกระจายในความถี่ที่ห่างจากความถี่เรโซแนนซ์ออกไป ส่วน $n_0(\omega)$ สามารถคำนวณได้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n_0^2(\omega) = 1 + \sum_{j=1}^{n} \frac{A_j \omega_j^2}{\omega_j^2 - \omega} \qquad \text{(ก.4)}$$

โดยที่ $j$=1,2,....$n$ เมื่อ $\omega_j$ คือความถี่เรโซแนนซ์ และ $A_j$ คือ ความแรงในการออสซิลเลท ผลรวมของสมการ ก.4 สามารถขยายช่วงของการเรโซแนนซ์ทั้งหมดในย่านความถี่ที่นำไปใช้และในกรณีของเส้นใยนำแสง พารามิเตอร์ $A_j$ และ $\omega_j$ ได้มาจากกราฟของการกระจายที่วัดได้จากการทดลองกับการใช้สมการ ก.4 โดยการให้ $n$=3 ซึ่งค่าที่ได้ขึ้นกับจำนวนของสารที่โดปเข้าไปในเส้นใยนำแสงชนิดต่าง ๆ แต่สำหรับเส้นใยนำแสงของซิลิกาบริสุทธิ์แล้ว พารามิเตอร์ที่พบได้เป็น $A_1$=0.696, $A_2$=0.408, $A_3$=0.897, $\lambda_1$ =0.0684, $\lambda_2$ =0.116 และ $\lambda_3$ =9.90 โดยที่ $\lambda_j = 2\pi c/\omega_j$

นอกจากนี้การกระจายในเนื้อสารยังสนับสนุนให้เกิดคุณสมบัติในการกระจายของกลุ่มคลื่นที่คำนวณได้จาก

$$k' = \frac{1}{v_g} = \frac{\partial(\omega n_0 / c)}{\partial \omega} = \frac{1}{c}\left(n_0 + \omega \frac{\partial n_0}{\partial \omega}\right) \qquad \text{(ก.5)}$$

$$k'' = \frac{1}{c}\left(2\frac{\partial n_0}{\partial \omega} + \omega \frac{\partial^2 n_0}{\partial \omega^2}\right) \qquad \text{(ก.6)}$$

ส่วนค่า $k''$ อื่นก็ทำได้ด้วยวิธีเดียวกัน จากสมการ ก.5 จะได้ว่า $\partial^2 n_0/\partial\omega^2$ ระหว่างคลื่นเรโซแนนซ์ 2 คลื่น เมื่อเปลี่ยนเครื่องหมายลบ (มีค่า $\omega$ น้อย) ไปเป็นบวกขณะที่ $\omega$ เพิ่มขึ้น ในความเป็นจริงแล้วค่า $k''$=0 เมื่อความยาวคลื่น $\lambda = \lambda_0$ (≈1.3 $\mu$m) และค่า $k''$ สามารถหาได้จาก

$$k'' = -5.3 \times 10^{-2}\left(1 - \frac{\lambda_0}{\lambda}\right)\frac{\lambda}{2\pi c^2} \qquad \text{(ก.7)}$$

เมื่อ $\lambda = 2\pi c/\omega$ คือความยาวคลื่นแสงในอวกาศ

**3. การกระจายในท่อนำคลื่น *(waveguide dispersion)***

การกระจายกรณีนี้เกิดขึ้นจากความแตกต่างของความเร็วกลุ่มที่ต่างกัน เนื่องจากการเลื่อนไปของ $\lambda_0$ ด้วยขนาด 30-40 nm เพื่อให้การกระจายทั้งหมดมีค่าเป็นศูนย์ โดยปกติการกระจายภายใน เนื้อสารจะลดลงไปอยู่ในความยาวคลื่นช่วง 1.3-1.6 $\mu$m ซึ่งเป็นย่านความยาวคลื่นที่สัมพันธ์กับระบบการสื่อสาร

โดยทั่วไปแล้วการกระจายในท่อนำคลื่นมักจะน้อยกว่าการกระจายภายในเนื้อสาร ซึ่งอาจตัดทิ้งไปได้ แต่อย่างไรก็ตามการกระจายในท่อนำคลื่นก็จะกลายมาเป็นสิ่งสำคัญและไม่อาจตัดทิ้งไปได้เมื่อ $\lambda = \lambda_0$ (≈1.3 $\mu$m) เพราะที่บริเวณนี้ไม่มีการสูญเสียของการกระจายภายในเนื้อสาร พารามิเตอร์ของเส้นใยนำแสงที่สนับสนุนให้เกิดการกระจายในสายส่ง คือ

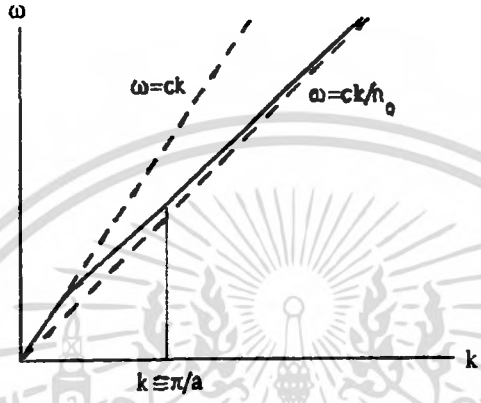
1) รัศมีของ core ($a$) โดยรัศมียิ่งกว้าง การกระจายก็ยิ่งมากขึ้น เพราะจะเกิดการแตกต่างของความเร็วกลุ่มได้หลายโหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ดัชนีหักเหที่เปลี่ยนไป ($\Delta$)

อย่างไรก็ตาม ท่อนำคลื่นจะมีคุณสมบัติของการนำสมบูรณ์เมื่อ $\lambda << a$ และไม่เกิดการนำเมื่อ $\lambda >> a$ ดังนั้น คุณสมบัติในการกระจายจึงอธิบายได้ด้วย

$$k = \frac{\omega}{c} \qquad \text{ที่ } \lambda >> a$$
$$k = \frac{n_0 \omega}{c} \qquad \text{ที่ } \lambda << a \qquad \text{(ก.8)}$$




ก.2 : แสดงความสัมพันธ์ของการกระจายของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเส้นใยนำแสง

ดังแสดงในรูป ก.2 ผลที่ตามมาของการกระจายในสายส่งให้ค่า $k''$ เป็นบวกที่ $\lambda$ ค่ามาก และให้ $k''$ เป็นลบที่ $\lambda$ ค่าน้อย คุณลักษณะเหล่านี้ตรงกันข้ามกับการกระจายในเนื้อสาร ดังนั้นการออกแบบเส้นใยนำแสงที่ให้การกระจายกลุ่มหมดไปทำได้ด้วยการเลื่อนความยาวคลื่นไปยังความยาวคลื่นที่ให้การสูญเสียต่ำที่สุดคือ $\lambda$ = 1.55 $\mu$m

สำหรับการกระจายกลุ่มของเส้นใยนำแสงอธิบายลักษณะได้ด้วยพารามิเตอร์ $D$ ที่กำหนดให้เป็น

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} k'' \qquad \text{(ก.9)}$$

เมื่อ $D$ มีหน่วยเป็น ps/(nm.km) และวัดได้ด้วยช่วงเวลาดีเลย์ในระดับ ps ของพัลส์แสง 2 ลูกกับการแยกกันของความยาวคลื่น 1 นาโนเมตร บนระยะทาง 1 กิโลเมตร

## ก.2 คุณสมบัติไม่เชิงเส้นของเส้นใยนำแสง

การตอบสนองของสารได้อิเลคตริคที่มีต่อแสงได้ให้คุณสมบัติแบบไม่เชิงเส้นด้วย แม้ว่าการตอบสนองแบบไม่เชิงเส้นมีผลเพียงเล็กน้อย แต่รูปทรงทางเรขาคณิตของท่อนำคลื่นกับภาคตัดขวางขนาดเล็กตลอดความยาวของเส้นใยนำแสงได้ทำให้ปรากฏการณ์ไม่เชิงเส้นกลายเป็นสิ่งสำคัญ ปรากฏการณ์ไม่เชิงเส้นที่สำคัญคือ ปรากฏการณ์ของเคอร์ (Kerr effect),การกระเจิงของรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาน(Raman scattering) และการกระเจิงของบริลลอน (Brillouin scattering) โดยปรากฏการณ์เหล่านี้ทำให้ทัศนศาสตร์ไม่เชิงเส้นมีความสำคัญในการใช้งานทางเทคโนโลยีทางเสง ซึ่งรวมไปถึงการใช้งานทางการสื่อสารทางแสงด้วย

**1. ปรากฏการณ์ของเคอร์ *(Kerr Effects)***

การตอบสนองแบบไม่เชิงเส้นได้สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่แบบไม่มีฮาร์โมนิคของพันธะอิเลคตรอน เนื่องมาจากการเปลี่ยนรูปวงโคจรของอิเลคตรอนภายในโมเลกุลของแก้ว พิจารณาสนามไฟฟ้าที่มีการโพลาไรซ์ที่เกิดขึ้น $P$ จากไดโพลไฟฟ้าของแอมพลิจูดของฟูเรียร์ไม่เป็นเส้นตรง แต่กลับเกี่ยวข้องกับเทอมที่สูงขึ้นในแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า ดังสมการ

$$P = \varepsilon_0\left[\chi^{(1)} \cdot E + \chi^{(2)} : EE + \chi^{(3)} : EEE + \ldots\right] \qquad \text{(ก.10)}$$

โดยที่ $\varepsilon_0$ เป็น permittivity ในอวกาศ

$\chi^{(j)}$ ($j$=1,2,...) เป็น susceptibility อันดับที่ $j$

เมื่อพิจารณาผลการโพลาไรซ์ของแสง $\chi^{(j)}$ เป็น tensor ของช่วง $j$+1

เมื่อ * susceptibility เชิงเส้น $\chi^{(1)}$ มีดัชนีหักเหเชิงเส้น $n_0$ และสัมประสิทธิ์ในการลดทอน $\gamma$

* susceptibility อันดับ 2 $\chi^{(2)}$ ตอบสนองต่อการเกิดฮาร์โมนิคอันดับที่ 2 อย่างไรก็ตามถ้า $\chi^{(2)}$ ไม่ประกอบด้วยปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ก็สามารถตัดทิ้งได้ ด้วยเหตุผลนี้เส้นใยนำแสงจะไม่แสดงปรากฏการณ์แบบไม่เชิงเส้น แม้ว่า electric-quadrupole และโมเมนต์แม่เหล็กสามารถก่อให้เกิดผลแบบไม่เชิงเส้นอันดับสองได้อย่างไม่รุนแรงนัก

* susceptibility อันดับ 3 เป็นปรากฏกาณ์แบบไม่เชิงเส้นอันดับต่ำที่สุดในเส้นใยนำแสง พบว่า คลื่นแสงกับความถี่ $\omega$ ตอบสนองแบบไม่เชิงเส้นในเทอม $\chi^{(3)}$ ผ่านอันตรกิริยาของ $\omega$ ในส่วนประกอบของ -$\omega$ และ $\omega$ โดยการตอบสนองนี้ได้สนับสนุนการเปลี่ยนแปลงแบบไม่เชิงเส้นของดัชนีหักเห คือ

$$n\left(\omega,|E|^2\right) = n_0(\omega) + n_2(\omega)|E|^2 \qquad \text{(ก.11)}$$

เมื่อ $|E|$ คือ แอมพลิจูดยังผล (root mean square) ของสนามไฟฟ้า และ $n_2$ สัมพันธ์กับ $\chi^{(3)}$ โดย

$$n_2(\omega) = \frac{3}{4n_0}\chi^{(3)}_{xxx} \qquad \text{(ก.12)}$$

สำหรับคลื่นที่โพลาไรซ์เชิงเส้นในทิศ $x$ ให้ดัชนีหักเหไม่เชิงเส้น $n_2$ เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของเคอร์ สำหรับซิลิกามีค่าประมาณ $1.3\times10^{-22}$ $m^2/V^2$ โดยสัมประสิทธิ์ของเคอร์มักอ้างอิงอยู่ในหน่วยทางการปฏิบัติจาก

$$N_2 = 3.2\times10^{-16}\ cm^2/W$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$n_2$ สัมพันธ์กับ $N_2$ โดย

$$n_2 = n_0\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}N_2 \qquad \text{(ก.13)}$$

เมื่อ $\mu_0$ คือ permittivity ในอวกาศ เนื่องจากปรากฏการณ์นี้ เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่แบบไม่มีฮาร์โมนิคของแรงยึดเหนี่ยวพันธะอิเลคตรอนในโมเลกุล ซึ่งมีเวลาในการตอบสนองอยู่ในช่วง $10^{-15}$ วินาที ดังนั้นจึงสามารถใช้สมการ ก.11 แก้ปัญหาของเวลาในการตอบสนองอย่างรวดเร็วนี้ และจากที่ขนาดของสนามไฟฟ้าในเส้นใยนำแสงเปลี่ยนแปลงภายในภาคตัดขวางของมัน ดังนั้นในการประมาณการตอบสนองของค่าเฉลี่ย $|E|^2$ ที่เหมาะสมจึงควรพิจารณาได้

**2. ปรากฏการณ์ของรามาน *(Raman effect)***

เมื่อคลื่นแสงตกกระทบที่ $\omega = \omega_0$ ไปกระตุ้นความถี่เรโซแนนซ์ $\omega_R$ ทำให้ความถี่เลื่อนต่ำลงเกิดเป็นความถี่ใหม่ขึ้น ซึ่งเรียกว่า สโตกโหมด (Stoke mode) มีค่าเป็น $\omega-\omega_R$ ซึ่งเป็นขบวนการที่ทำให้เกิดการกระเจิงของรามาน (Raman scattering)

การกระเจิงของรามาน เป็นการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของโฟตอนกับโฟตอนที่มีพลังงานต่ำลง ทำให้เกิดความแตกต่างในรูปโฟนอนของแสงที่มีความถี่ประมาณ $10^{13}$ Hz ซึ่งโฟนอนที่เกิดขึ้นเป็นส่วนสำคัญที่สนับสนุนให้เกิดการเรโซแนนซ์ขึ้น และเนื่องจากโฟนอนของแสงมีโมเมนตัมค่าน้อย ๆ $(k_R \approx 0)$ ดังนั้นแสงที่กระเจิงออกจึงแพร่ไปในทิศเดียวกันกับแสงตกกระทบ โดยมีความเร็วกลุ่มประมาณได้ด้วย $\omega-\omega_R$ อย่างไรก็ตามขบวนการการกระเจิงจะมีการสูญเสียพลังงานของโฟตอนตกกระทบด้วยจำนวน $\hbar\omega_R$ และก่อให้เกิดการสูญเสียเชิงกลในเส้นใยนำแสงตามมา แต่การสูญเสียก็สามารถตัดทิ้งได้ที่ระดับกำลังงานต่ำ เนื่องจากการกระเจิงในภาคตัดขวางมีค่าสูงกว่าการกระเจิงของรามาน

เมื่อความถี่บีทระหว่างคลื่นตกกระทบกับคลื่นกระเจิง ได้ยกระดับโฟนอนของแสงทั้งหมดที่ทำให้ขบวนการการกระเจิงกระตุ้นให้แอมพลิจูดของคลื่นเพิ่มขึ้นแบบเอกโปเนนเชียลในทิศเดียวกันกับการแพร่ ถ้าในการกระเจิงครั้งหนึ่ง ๆ มีกำลังงานตกกระทบมากกว่ากำลังงานต่ำสุด (threshold) ขบวนการนี้จึงเรียกว่า การกระเจิงของรามานที่ถูกกระตุ้น [stimulated Raman scattering (SRS)] และให้การกระเจิงมีทิศไปข้างหน้า

ระดับกำลังงานต่ำสุดของ SRS คำนวณได้จากการพิจารณาว่าความเข้มแสงที่กระเจิงเกิดขึ้นจากสัญญาณรบกวน กำลังงานตกกระทบสูญเสียกำลังงานครึ่งหนึ่งไปกับ SRS ที่ปลายเอาท์พุทของเส้นใยนำแสง คำนวณได้จาก

$$\frac{g_R P_{th} L_{eff}}{A_{eff}} \cong 16 \qquad \text{(ก.14)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $g_R$ คือ สัมประสิทธิ์ของอัตราขยายของรามาน ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับการแยกกันของความถี่ระหว่างสโตกโหมดกับรามานโหมด โดย $g_R$=0 เมื่อไม่เกิดการแยกกันของความถี่ และมีค่าเพิ่มขึ้นตามการแยกกันของความถี่ ซึ่งในซิลิกาแล้ว $g_R$ มีค่าประมาณ $10^{-13}$ m/W

$A_{eff}$ คือ พื้นที่ของ core ยังผล

$L_{eff}$ คือ ความยาวของอันตรกิริยา ซึ่งกำหนดได้ด้วย

$$L_{eff} = \left[1 - \exp(-\alpha L)\right]/\alpha \qquad \text{(ก.15)}$$

เมื่อ $\alpha$ คือ สัมประสิทธิ์ของการลดทอนในเส้นใยนำแสง สำหรับการสื่อสารแล้วเส้นใยนำแสงมีความยาวพอที่ $L_{eff}$ จะประมาณได้เป็น $1/\alpha$ และถ้าแทน $A_{eff}$ ด้วย $\pi w^2$ ดังนั้น $P_{th}$ คำนวณได้เป็น

$$P_{th} \approx 16\alpha\left(\pi w^2\right)/g_R \qquad \text{(ก.16)}$$

เมื่อ $w$ คือ spot size ถ้าให้ $\pi w^2$=50 $\mu m^2$ และ $\alpha$ =0.2 dB/km จะให้ $P_{th}$ มีค่าประมาณ 570$\mu$m ที่ความยาวคลื่น 1.55 $\mu$m เนื่องจากกำลังงานที่ส่งเข้าไปในระบบการสื่อสารโดยทั่วไปแล้วต่ำกว่า 10mW ดังนั้น SRS จึงไม่สนับสนุนให้เกิดการสูญเสียภายในเส้นใยนำแสง

**3. ปรากฏการณ์ของบริลลอน *(Brillouin effect)***

การกระเจิงของบริลลอน (Brillouin scatteing) จะคล้ายกับการกระเจิงของรามาน ยกเว้นแต่ว่าการกระเจิงของบริลลอนเกิดจากการกระตุ้นของคลื่นหรือโฟนอนของเสียง แทนที่จะเกิดจากโฟนอนของแสงเหมือนกรณีของการกระเจิงของรามาน

เนื่องจากคลื่นเสียงแพร่ด้วยความเร็ว $v_a$ ที่น้อยกว่าความเร็วแสงในอวกาศ $c$ มาก ๆ ($v_a << c$) และ $v_a$ มีโมเมนตัมมาก ดังนั้น

$$k_p = \omega_a / v_a$$

และสภาวะเรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นคือ

$$\omega_a = \omega_0 - \omega_s \cong \frac{c}{n_0}\left(k_0 - k_s\right) \qquad \text{(ก.17)}$$

เมื่อ $\omega_a$ คือ ความถี่โฟนอน และ $\omega_s$ คือความถี่ของสโตก

$k_0$ และ $k_s$ คือ เวกเตอร์คลื่นของปัมพ์โหมดและสโตกโหมดตามลำดับ

สำหรับสภาวะ $|v_a| << |c|$ ที่สอดคล้องกันของเลขคลื่น แก้ปัญหาได้ด้วยการให้ $k_s \cong -k_0$ แสดงว่า ต้องการให้คลื่นกระเจิง (สโตกโหมด) แพร่เข้าไปในทิศตรงกันข้ามกับคลื่นตกกระทบ (ปัมพ์โหมด)

การกระเจิงของบริลลอนเป็นการกระเจิงไปข้างหลัง ซึ่งคลื่นที่กระเจิงแพร่เข้าไปในทิศตรงกันข้ามกับคลื่นตกกระทบ ถ้าคลื่นตกกระทบเป็นคลื่นต่อเนื่อง ดังนั้นคลื่นกระเจิงสามารถเกิดได้อย่างต่อเนื่องในเวลาเดียวกับคลื่นตกกระทบ และความถี่บีทระหว่างโหมดของปัมพ์กับสโตกทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดการกระตุ้นคลื่นเสียงอย่างต่อเนื่อง และมีค่าเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โปเนนเชียล เรียกว่าการกระเจิงของบริลลอนที่ถูกกระตุ้น [stimulated Brillouin scattering (SBS)]

กำลังงานต่ำสุดของ SBS สามารถคำนวณได้ด้วยการใช้ขบวนการที่คล้ายกันกับกรณีของ SRS ซึ่งแสดงได้ด้วย

$$\frac{g_B P_{th} L_{eff}}{A_{eff}} \approx 21 \qquad \text{(ก.18)}$$

โดยที่ $g_B$ คือ สัมประสิทธิ์ของอัตราขยายบริลลอน ซึ่งในซิลิกามีค่า $g_B \cong 6\times10^{-10}$ m/W จากนั้นใช้หลักการคำนวณเช่นเดียวกับกรณี SRS จะได้

$$P_{th} = 21\alpha\left(\pi w^2\right)/g_B \qquad \text{(ก.19)}$$

ด้วยค่าของ $g_B$ ที่มากกว่าค่าของ $g_R$ อยู่อันดับ 2 ขึ้นไป ทำให้ $P_{th}$ มีค่าต่ำกว่าโดยมีค่าเป็น1 mW ที่ความยาวคลื่น 1.55 $\mu$m และด้วยกำลังงานต่ำสุดที่มีค่าต่ำ จึงทำให้ SBS สามารถจำกัดพลังงานที่ถูกส่งเข้าในเส้นใยนำแสงได้อย่างมากมาย

การคำนวณ $P_{th}$ ได้ตัดผลของความกว้างที่เกี่ยวข้องกับแสงตกกระทบ เนื่องจาก แถบสเปกตรัมของอัตราขยายที่แคบมาก ๆ (ปกติมีความกว้างริ้ว<100 MHz) ทำให้กำลังงานต่ำสุดเพิ่มขึ้นไปได้ถึง 10 mW หรือมากกว่าขึ้นกับความกว้างริ้วของสเปกตรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ข.

## Finite Element Method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

JOURNAL OF MODERN OPTICS, 1994, VOL. 41, NO. 6, 1135–1139

# Study of transverse effects in optical bistable ring resonators using the finite element method

P. A. BUAH, B. M. A. RAHMAN and K. T. V. GRATTAN
City University, Department of Electrical,
Electronic and Information Engineering,
Northampton Square, London EC1V 0HB, England

(*Received 6 October 1993 and accepted 18 October 1993*)

**Abstract.** An extension of the finite-element/finite-difference propagation algorithm has been applied to simulate the propagation of a laser beam in a nonlinear optical bistable ring resonator. Agreement with established results has been shown, applying an inherently versatile numerical technique offering a high level of efficiency.

## 1. Introduction

Research in the area of nonlinear optics, especially on transverse effects has intensified in recent years owing to the arsenal of opportunities it offers [1]. Application areas which have attracted much research attention recently include optical computing, signal processing and optical neural networks [2]. Of the transverse effects studied so far, optical bistability has provided a considerable level of motivation for research when compared to most other nonlinear-optical phenomena, due to its potential for application to modern optoelectronic systems.

The fast-Fourier transform or beam propagation method (BPM) has been widely used for the numerical simulation of optical bistability in ring resonators [3]. However, as pointed out in [1], the fast-Fourier transform is not so well adapted to problems with cylindrical symmetry, of which one takes advantage, when modelling Gaussian beams (the fundamental mode profile for most lasers). The fast-Hankel-transform method and the finite-difference methods, which take advantage of cylindrical symmetry have also been applied to the study of optical bistability. However, there is a doubling in computing time when using the fast-Hankel-transform method [1] and the finite-difference method becomes more difficult to program when non-uniform meshes are used. There is therefore the need to develop an efficient and versatile method to compete with existing numerical techniques [1]. The finite element method has for the past decade proved to be a very efficient and versatile method in linear and nonlinear optics for modal analysis [4]. Recently there has been an interest in the extension of this method to analyse evolutionary problems in optics [5–7]. It has been shown that by applying the split-operator technique, the finite element method is as efficient as the BPM [6, 7] but also has the advantage of allowing larger step sizes than the BPM [7]. Some of the features which have made the finite element method a very powerful tool for optical modal analysis have been the use of non-uniform and adaptive mesh and infinite-elements. These aspects, in addition to the interpolatory nature of its functional representation enable further reduction of the number of mesh points, thereby offering a significant increase of the computational efficiency.

0950-0340/94 $10.00 © 1994 Taylor & Francis Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

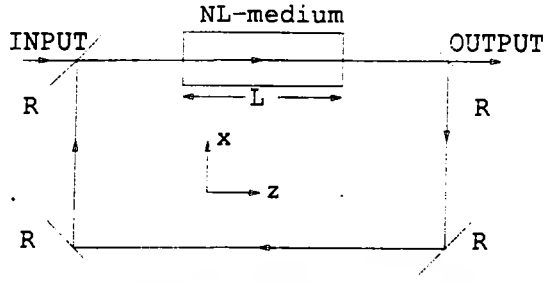



Figure 1. Schematic diagram of the nonlinear ring resonator.

In this paper we have extended the recently developed finite-element/finite-difference beam propagation algorithm [5], taking advantage of the splitting technique [3, 4], to simulate the one-dimensional transverse behaviour of a laser beam profile in a nonlinear ring resonator. The model we study is that of an externally pumped passive ring resonator which is filled with a two-level nonlinear medium (figure 1). Numerical simulation of this model has been shown to exhibit a wide range of interesting behaviour. Adopting the same scheme and notation as that of Moloney [8, 9] we solve for the one-transverse-dimensional complex field $G_n(\eta, z)$, during its $n$th transit through the medium, as the solution of the infinite-dimension map:

$$2\mathrm{i}\frac{\partial}{\partial\xi}G_n+\frac{1}{f}\frac{\partial^2}{\partial\eta^2}G_n+N(G_nG_n^*)G_n=0, \tag{1}$$

$$G_n(\eta,0)=a(\eta)+R\exp(\mathrm{i}kl)\,G_{n-1}(\eta,p),\ G_0=0, \qquad n>0, \tag{2}$$

where $G_n(\eta,0)$ represents the internal complex cavity field at the start of the nonlinear medium on the $n$th cavity pass, $a(\eta)\,(=a_p\exp(-\eta^2))$ is the external pump field profile, $R$ is the mirror reflectivity, $kl$ is the finite cavity detuning and $N(G_nG_n^*)=-(1+2|G_n|^2)^{-1}.\,(1/f)\,\partial^2/\partial\eta^2)\,G_n$ represents the diffractive part of equation (1), $\xi$ respresents the propagation direction, while $\eta$ is the transverse coordinate and $p$ the effective length of the nonlinear medium.

## 2. The method

The initial-boundary value problem (1) is solved by the standard Galerkin finite element method using linear elements for the transverse direction only and the resulting system of equations is solved in the propagation domain using the Crank–Nicolson finite-difference method. The transverse grid points of the nonlinear medium are defined to be $\eta_i=\mathrm{i}\Delta\eta$, where $\Delta\eta$ is the mesh division. The mesh divisions can have different lengths, so that one can focus in on special regions of interest along the $\eta$ direction, for example, where the maximum change of field values is expected. In contrast the standard BPM requires a uniform sampling along the $\eta$ direction due to the use of the fast Fourier transforms. The basis functions $\Psi_i(\eta)$ vanish for $|\eta-\eta_i|>\Delta\eta$, increase linearly from 0 to 1 over $\eta_{i-1}<\eta<\eta_i$, and decrease from 1 to 0 over $\eta_i<\eta<\eta_{i+1}$. The basis function can be used to approximate the function by a piecewise linear function with exact agreement at the grid points. Using the finite element method, expanding the field $G_n(\eta,\xi)$ as $G_n(\eta,\xi)=\Sigma_{m=1}^{N}G_{nm}(\xi)\Phi_m(\eta)$, where $G_{nm}(\xi)$ is the coefficient to be determined and $\Phi_m(\eta)$ is a set of linear shape functions, the transverse section is discretized into subsections with width $\Delta\eta$. Equation (1) is

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

then multiplied by the shape function $\Psi_i (i = 1,2, \ldots n)$ and integrated by parts, considering the boundary conditions; this results in a set of nonlinear ordinary differential equations. The resulting ordinary differential equations are solved in the $\xi$ domain (propagation direction) by applying the Crank–Nicolson finite-difference scheme to yield the following algorithm:

$$(A + \theta \Delta \xi L) G_n'(\eta, \xi + \Delta \xi) = [\mathbf{A} + (\theta - 1)\Delta \xi \mathbf{L}] G_n(\eta, \xi). \tag{3}$$

Here **A** and **L** are square matrices with the respective elements $A_e$ and $L_e$ as

$$A_e = -\int \Phi_i(\eta) \Phi_m(\eta)\, d\eta, \tag{4}$$

$$L_e = \int \left( -\frac{d\Phi_i}{d\eta}\frac{d\Phi_m}{d\eta} + N\Phi_i\Phi_m \right) d\eta. \tag{5}$$

Step-by-step solution of the matrix equation (3) for $\theta = 0{\cdot}5$ and a series of steps yield the evolutional variation of the transverse laser beam in the nonlinear medium. For the case of the one-dimensional cross-section, equation (3) can be solved extremely easily using a Gauss method for the solution of tridiagonal and symmetric matrices, as **A** and **L** are tridiagonal matrices. As pointed out earlier, a considerable computational efficiency was achieved by using the split-operator technique:

$$G_n(\eta, \xi + \Delta \xi) = G_n'(\eta, \xi + \Delta \xi) \exp [-0{\cdot}5 i \Delta \xi N (G_n G_n^*)]. \tag{6}$$

In this case there is no need explicitly to reinvert the left hand side to obtain the fields at the next step. For two-dimensional cross-sections, where finite triangles are defined over the transverse region rather than finite line elements, equation (3) is no longer a simple tridiagonal system. However, since matrices **A** and **L** will still be sparse regular matrices, this can be solved efficiently using commercially available fast sparse matrix solvers.

## 3. Results and conclusions

By confining our simulation to one transverse dimension we have been able to trace the behaviour of a Gaussian input pulse through the resonator. Parameters used to generate the following figures are obtained from the work of Moloney [8], i.e., $p = 2$, $F = 200$, $kl = 0{\cdot}4$ rad, $a_p = 0{\cdot}194$, $R = 0{\cdot}9$. Figure 2 shows the initial transverse profile on the first resonator pass and the switched-on beam profile after

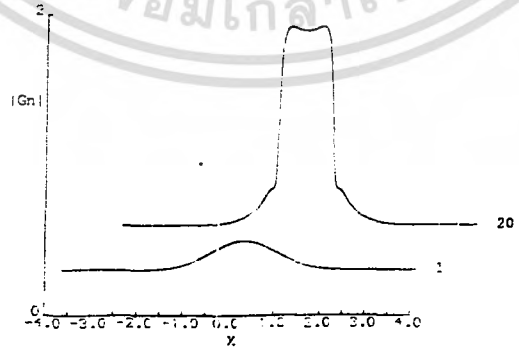



Figure 2. The beam output profiles after the first and 20th passes in the resonator ($n = 1, 20$).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

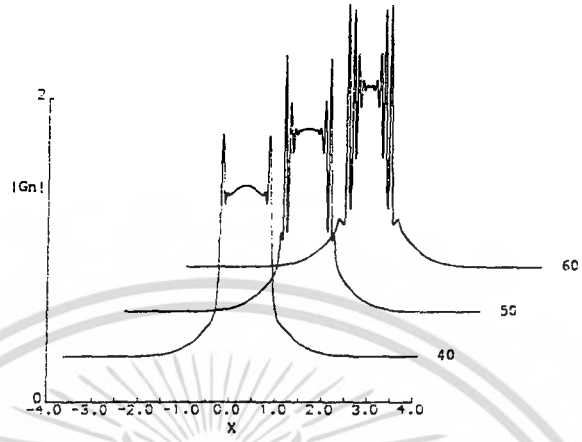



Figure 3. The initiation of the spatial ring structures after the initial transient ($n = 40, 50, 60$).

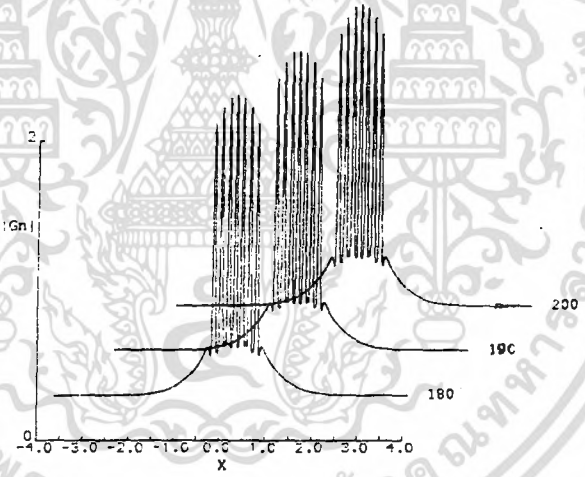



Figure 4. The asymptotic state ($n = 180, 190, 200$

the 20th pass. The initiation of the transverse spatial rings at the sharp edges of the switched-on beam, after the initial transient, are shown in figure 3 ($n = 40, 50$ and 60), while the asymptotic state, which had developed by the 200 h pass with seven solitary waves (solitons) for the given parameters, are shown in figure 4. The behaviour shown in the figure agrees well with that obtained by Moloney [8].

We have therefore presented what we believe to be a useful numerical simulation technique to study transverse effects in optical bistable reaohators. Preliminary results obtained for the one-dimensional simulations agree in a satisfactory way with the well established results of Moloney [8] who applied the fast-Fourier transform technique. A direct comparison has not been undertaken in this work but, as an interpolation method, our approach needs fewer points than the BPM. The typical number of mesh division usually chosen for the BPM for this type of problem is 256.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

According to [6] the equivalent number of points needed for FEM is $N_p = N_{eq}/(2n + 1)$, where $n$ is the order of interpolation. This implies that we need only about 80 nodal points for the solution of this problem. This number can be reduced still further by using non-uniform meshes and taking advantage of the symmetry of the situation. We believe therefore that this method with its inherent versatility will be a useful numerical technique for the analysis of optical bistability in interferometers and Fabry–Perot resonators. Although we have only presented results for the one dimension and unidirectional case, the method can easily be extended to two transverse dimensional and counterpropagation problems.

**Acknowledgment**

Very helpful discussions with H. E. Hernandez-Figueroa of the Department of Electrical and Electronics Engineering, University College London, are gratefully acknowledged.

**References**

[1] Abraham, N. B., and Firth, W. J., 1990, *J. opt. Soc. Am.* B, **7**, 951 (and references therein).
[2] Akhmanov, S. A., Vorontsov, M. A., Ivanov, V. Yu., Larichev, A. V., and Zheleznykh, N. I., 1992, *J. opt. Soc. Am.* B, **9**, 78.
[3] Moloney, J. V., Belic, M. R., and Gibbs, H. M., 1982, *Optics Commun.*, **41**, 379.
[4] Rahman, B. M. A., Davies, J. B., and Fernandez, F. A., 1991, *Proc. IEEE*, **79**, 1442.
[5] Koch, T. B., 1988, PhD Thesis, University College, London.
[6] Hayata, K., Misawa, A., and Koshiba, M., 1990, *J. opt. Soc. Am.* B., **7**, 1772.
[7] Hernandez-Figueroa, H. E., 1991, *International Conference on Computation in Electromagnetics*, 25–27 November 1991, London (London: IEE), no. 350, p. 167.
[8] Moloney, J. V., 1985, *I.E.E.E. J. quant. electron.*, **21**, 1393.
[9] Adachihara, H., McLaughlin, D. W., Moloney, J. V. and Newell, A. C., 1989, *J. math. Phys.*, **29**, 63.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้