



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

ปริญญา

ฟิสิกส์

ฟิสิกส์

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง

การศึกษาเชิงวิเคราะห์ทวิเสถียรเชิงแสงในเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนซิลิกอน

Analytical Study of Optical Bistability in Silicon Ring Resonator

นามผู้วิจัย

นายชาญณรงค์ กุศลจรัส

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรศักดิ์ เชียงกา, Dr.rer.nat.)

หัวหน้าภาควิชา

(อาจารย์วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ, วท.ค.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่

เดือน

พ.ศ.

สืบสีตจี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาเชิงวิเคราะห์ทวิเสถียรเชิงแสงในเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนซิลิกอน

Analytical Study of Optical Bistability in Silicon Ring Resonator

โดย

นายชาญณรงค์ กุศลจรัส

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ชาญณรงค์ กุศลจีรัง 2555: การศึกษาเชิงวิเคราะห์ทวิเสถียรเชิงแสงในเรโซเนเตอร์แบบ
วงแหวนซิลิกอน ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์) สาขาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรศักดิ์ เชียงกา, Dr.rer.nat. 71 หน้า

ไมโครเรโซเนเตอร์วงแหวนซิลิกอนเป็นอุปกรณ์เชิงแสงที่สำคัญในวงจรเชิงแสงความเร็วสูง
วงจรมิติเล็กและวงจรมวลผลเชิงแสง โดยมีการประยุกต์ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกรองแสงปรับค่า
ได้ ตัวชดเชยการกระจายแสง เช่น เซอร์และเลเซอร์ เป็นต้น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาเชิงทฤษฎีของปรากฏการณ์ไม่เชิงเส้นทวิเสถียรเชิงแสงของคลื่น
ต่อเนื่องที่แพร่กระจายไปในท่อนำคลื่นซิลิกอนบนฉนวน การวิวัฒนาการของแสงในท่อนำคลื่นซิลิกอน
บนฉนวนอธิบายได้ด้วยสมการคลื่นในตัวกลางของแมกซ์เวลล์ โดยพิจารณาการกระจายแสง
การดูดกลืนแสง การดูดกลืนสองโฟตอน การดูดกลืนของพาหะอิสระ การกระจายแสงเนื่องจากพาหะ
อิสระและผลของแสงเชิงความร้อน

จากการศึกษาพบว่าทวิเสถียรเชิงแสงไม่ขึ้นกับปรากฏการณ์การดูดกลืนสองโฟตอน
ฮิสเทอรีซิสของทวิเสถียรเชิงแสงจะกว้างขึ้นเมื่อความยาวคลื่นลดลง และความกว้างของฮิสเทอรีซิสจะ
ลดลงเมื่อเวลาชั่วชีวิตของพาหะอิสระเพิ่มขึ้น ผลของแสงเชิงความร้อนจะเหนี่ยวนำให้เกิดทวิเสถียรเชิง
แสงหลายครั้ง เราสาธิตเชิงทฤษฎีของสวิตช์เชิงแสงที่ความเข้มแสงอินพุตคงที่โดยการเปลี่ยนเวลาชั่ว
ชีวิตของพาหะอิสระ

Channarong Kusalajeerung 2012: Analytical Study of Optical Bistability in Silicon Ring Resonator. Master of Science (Physics), Major Field: Physics, Department of Physics.
Thesis Advisor: Assistant Professor Surasak Chiangga, Dr.rer.nat. 71 pages.

Silicon microring resonators have become one of the important optical devices in ultrafast, compact, all-optical processing circuits. Microring resonators have been implemented as tunable filters, dispersion compensators, sensor and lasers.

This thesis studies theoretically the optical bistability of continuous wave propagating within silicon-on-insulator waveguide. The evolution of the electric field in silicon-on-insulator waveguide can be described by Maxwell's equation, which includes dispersion, linear absorption, two-photon absorption, free-carrier absorption, free-carrier dispersion and thermo-optic effect.

We find that optical bistability in silicon-on-insulator ring resonator is independent of two-photon absorption. The hysteresis width increases (decreases) with decreasing (increasing) input wavelength (free-carrier lifetime). The thermo-optic effect induces multiple bistability. We demonstrate theoretically the optical switching by changing the free-carrier lifetime with constant input intensity.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

สืบสิทธิ์ มณีวิทย์ชัยเกษมสารศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรศักดิ์ เชียงกา ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้อบรมสั่งสอนวิชาความรู้ ด้านวิชาการ ด้านคุณธรรมและจริยธรรม รวมทั้งให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งตรวจและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชิดศักดิ์ คุณสมบัติ ประธานการสอบและ รองศาสตราจารย์ พงษ์แก้ว อุดมสมุทรหิรัญ ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำข้อคิดเห็นอันเป็นประโยชน์ ตลอดจนตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ นายสันทัต พิทักษ์วงศาภรณ์ ที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการเขียนโปรแกรม และการตรวจสอบโปรแกรม

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และพี่ ๆ ทุกคนที่สนับสนุน ช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จได้

ชาญณรงค์ กุศลจีรัง
มีนาคม 2555

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญภาพ	(2)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	23
อุปกรณ์	23
วิธีการ	23
ผลและวิจารณ์	26
สรุปและข้อเสนอแนะ	43
สรุป	43
ข้อเสนอแนะ	44
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	45
ภาคผนวก	47
ภาคผนวก ก การหาผลเฉลยของสมการการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า	48
ภาคผนวก ข การหาความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าอินพุทและเอาต์พุท	53
ภาคผนวก ค การคำนวณทวิเสถียรเชิงแสงด้วยโปรแกรม Matlab	56
ภาคผนวก ง การคำนวณระเบียบวิธีแบ่งครึ่งช่วงด้วยโปรแกรม Matlab	60
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	71

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	(ก) แผนภาพโครงสร้างของเรโซเนเตอร์แบบเพบริ-เปโรต์ (ข) ลักษณะของทวิเสถียรเชิงแสงของเรโซเนเตอร์	5
2	โครงสร้างของซิลิกอนบนแผ่นฉนวนแบบสัน (rib waveguide)	6
3	ปรากฏการณ์การดูดกลืนสองโฟตอนที่เกิดขึ้นภายในสารกึ่งตัวนำ	7
4	ปรากฏการณ์ไม่เชิงเส้นภายในเรโซเนเตอร์ชนิดซิลิกอน	9
5	ภาพด้านบนของเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนซิลิกอน รัศมี 5 ไมโครเมตร	10
6	สเปกตรัมส่งผ่านของเรโซเนเตอร์วงแหวนซิลิกอนและ ความยาวคลื่นสั้นพ้อง $\lambda_{resA} = 1561.87$ นาโนเมตร และ $\lambda_{resB} = 1580.04$ นาโนเมตร	10
7	กราฟทวิเสถียรเชิงแสงของเรโซเนเตอร์แบบวงแหวน รัศมี 5 ไมโครเมตร ความยาวคลื่น 1,562 นาโนเมตร เครื่องหมายบนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของสเปกตรัมส่งผ่านคือ 1. สเปกตรัมสั้นพ้องยังไม่มี การเลื่อนเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง ก่อนถึงวงฮิสเทอรีซิส 2. สเปกตรัมสั้นพ้องเกิดการเลื่อนไปสัมพันธ์กับ กำลังที่เพิ่มขึ้น 3. สเปกตรัมสั้นพ้องเลื่อนถึงตำแหน่งเดียวกัน กับความยาวคลื่นอินพุท	11
8	ลักษณะของทวิเสถียรเชิงแสงของเรโซเนเตอร์แบบเพบริ-เปโรต์ ความยาว 20 ไมโครเมตร (ก) เปรียบเทียบผลของการดูดกลืนสองโฟตอน เมื่อไม่คิดผลของปรากฏการณ์แสงเชิงความร้อน (เส้นทึบคือกรณีไม่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอน วงกลมคือกรณีคิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอน) (ข) ผลของปรากฏการณ์แสงเชิงความร้อน	13
9	(ก) แผนภาพโครงสร้างของเรโซเนเตอร์แบบวงแหวน (ข) ทวิเสถียรเชิงแสงกรณีไม่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอน (เส้นทึบ) และกรณีคิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอน (วงกลม)	15

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
10	ระเบียบวิธีแบ่งครึ่งช่วงเพื่อใช้หารากของสมการ $f(x) = 0$	20
11	แผนภาพแสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้า ในเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนที่มีการเชื่อมต่อสองครั้ง	26
12	ลักษณะของทวิเสถียรเชิงแสงในกรณีไม่คิด ผลของการดูดกลืนสองโฟตอนและแสงเชิงความร้อน ที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร เวลาชั่วชีวิตยังผลของตัวพาหะอิสระ 1 นาโนวินาที และค่าคงตัวการส่งผ่าน 0.5 (ก) ช่องธรู และ (ข) ช่องครอบ	30
13	ลักษณะของทวิเสถียรเชิงแสงในกรณีคิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอน แต่ไม่คิดผลของแสงเชิงความร้อนสำหรับความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร เวลาชั่วชีวิตยังผลของพาหะอิสระเท่ากับ 1 นาโนวินาที และค่าคงตัวการส่งผ่าน 0.5 (ก) ช่องธรู และ (ข) ช่องครอบ	33
14	เปรียบเทียบลักษณะของทวิเสถียรเชิงแสงในกรณีคิดผลของ การดูดกลืนสองโฟตอน (วงกลม) และไม่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอน (เส้นทึบ) แต่ทั้งสองกรณีไม่คิดผลของแสงเชิงความร้อนสำหรับ ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร เวลาชั่วชีวิตยังผลของพาหะอิสระ 1 นาโนวินาที และค่าคงที่ส่งผ่าน 0.5 (ก) ช่องธรู และ (ข) ช่องครอบ	35
15	ลักษณะของทวิเสถียรเชิงแสงในกรณีไม่คิดผลของ การดูดกลืนสองโฟตอนและแสงเชิงความร้อนที่ความยาวคลื่น 1550, 1545 และ 1540 นาโนเมตร เวลาชั่วชีวิตยังผลของตัวพาหะอิสระ 1 นาโนวินาที และค่าคงที่ส่งผ่าน 0.5 โดย (ก) ช่องธรู (ข) ช่องครอบ	37
16	ลักษณะของทวิเสถียรเชิงแสงในกรณีไม่คิดผลของ การดูดกลืนสองโฟตอนและแสงเชิงความร้อนที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร ค่าคงที่ส่งผ่าน 0.5 และเวลาชั่วชีวิตยังผลของตัวพาหะอิสระ 1, 1.5 และ 2.15 นาโนวินาที โดย (ก) ช่องธรู (ข) ช่องครอบ (ค) ภาพขยายในวงเส้นประของภาพ (ข)	40

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่

หน้า

- 17 เปรียบเทียบลักษณะของทวิเสถียรเชิงในกรณีคิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอน (วงกลม) และไม่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอน (เส้นทึบ) โดยทั้งสองกรณีคิดผลของแสงเชิงความร้อนที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร เวลาชั่วชีวิตยังผลของพาหะอิสระ 1 นาโนวินาที และค่าคงที่ส่งผ่าน 0.5 โดย (ก) ช่องธรู (ข) ช่องครอบ

42

การศึกษาเชิงวิเคราะห์ทวิเสถียรเชิงแสงในเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนซิลิกอน

Analytical Study of Optical Bistability in Silicon Ring Resonator

คำนำ

อุปกรณ์เชิงแสงมีความสำคัญสำหรับงานวิจัยยุคใหม่ เนื่องจากมีขนาดเล็กและสามารถประมวลผลได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งอุปกรณ์เชิงแสงที่กำลังได้รับความสนใจในงานวิจัยคือ ไมโครเรโซเนเตอร์รูปวงแหวน (micro ring resonator) เนื่องจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีทำให้มีการพัฒนาอุปกรณ์โฟโตนิก (photonic device) ที่ทำขึ้นจากสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิกอนบนแผ่นฉนวน (silicon-on-insulator) ซิลิกอนมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านอุปกรณ์โฟโตนิกและระบบประมวลผลเชิงแสง พุทธิกรรมเชิงกายภาพเช่น การดูดกลืนสองโฟตอน (two-photon absorption) การดูดกลืนของพาหะอิสระ (free-carrier absorption) การกระจายของพาหะอิสระ (free-carrier dispersion) และปรากฏการณ์แสงเชิงความร้อน (thermo-optic effect) จะปรากฏในช่วงของการโทรคมนาคมที่ความยาวคลื่น 1.55 ไมโครเมตร จากผลการทดลองพบว่าปรากฏการณ์ดังกล่าวข้างต้นทำให้เกิดปรากฏการณ์ไม่เชิงเส้นคือ ปรากฏการณ์ทวิเสถียรเชิงแสง (optical bistability) และมีผลต่อการควบคุมความเข้มแสงภายในซิลิกอน

ใน ค.ศ. 2009 Ivan D. Rukhlenko และคณะ ได้พัฒนาทฤษฎีเชิงวิเคราะห์สำหรับทวิเสถียรเชิงแสงภายในเรโซเนเตอร์แบบเฟบริ-เปโรต์ (Fabry-Perot resonator) และแบบวงแหวน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการอธิบายทวิเสถียรเชิงแสงในเรโซเนเตอร์รูปแบบต่างๆ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ทฤษฎีของ Ivan D. Rukhlenko และคณะ ในการศึกษาทวิเสถียรเชิงแสงภายในเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนซิลิกอนบนฉนวนที่มีการเชื่อมต่อกับท่อนำคลื่นเส้นตรงสอง

ครึ่ง (double-coupler ring resonator) โดยวิเคราะห์ผลของการสูญเสียเชิงเส้น (linear loss) และผลของการสูญเสียไม่เชิงเส้นเนื่อง การดูดกลืนสองโฟตอน ปราบฏการณ์แสงเชิงความร้อน การดูดกลืนของพาหะอิสระ และการกระจายแสงของพาหะอิสระ โดยเริ่มจากสมการทั่วไปที่ใช้ในการอธิบายการวิวัฒนาการของสนามไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง (continuous-wave: CW) ในท่อนำคลื่นแบบวงแหวนซิกลอนบนฉนวนและหาผลเฉลยสำหรับกรณีไม่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอนและปราบฏการณ์แสงเชิงความร้อน สำหรับกรณีที่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอนและปราบฏการณ์แสงเชิงความร้อนจะหาผลเฉลยโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากทั้งสองกรณี

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาทวิเสถียรเชิงแสงในเรโซเนเตอร์รูปร่างแหวนชนิดซิกอนบนฉนวนที่มีการสูญเสียเชิงแสงเนื่องจาก 1) การสูญเสียเชิงเส้นจากการดูดกลืนแสงและการกระเจิง 2) การดูดกลืนสองโฟตอน 3) การดูดกลืนของพาหะอิสระ 4) การกระจายแสงของพาหะอิสระ 5) ปฏิกิริยาการแผ่รังสีเชิงความร้อน
2. ศึกษาอิทธิพลของ ความยาวคลื่นสั้นพ้อง ช่วงชีวิตของพาหะอิสระ ต่อทวิเสถียรเชิงแสงในเรโซเนเตอร์รูปร่างแหวนชนิดซิกอนบนฉนวน

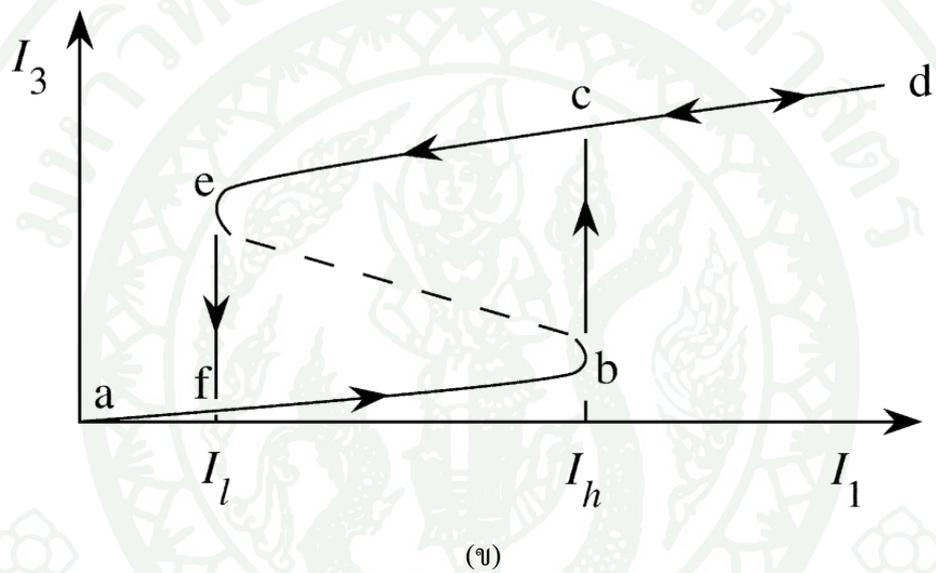
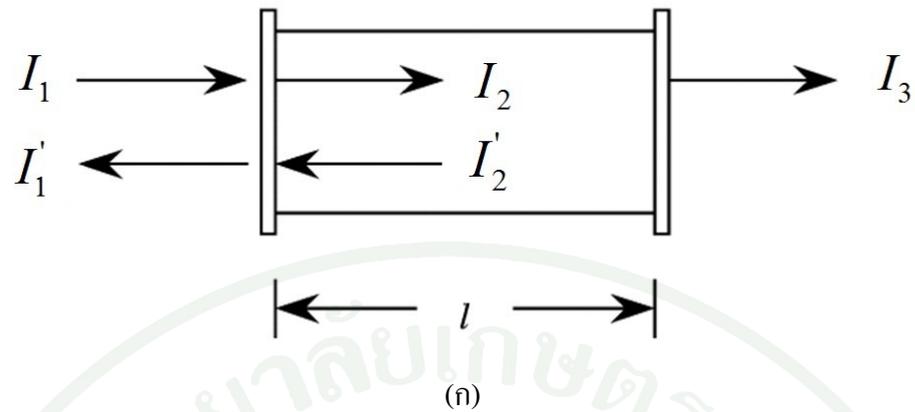
การตรวจเอกสาร

ทวิเสถียรเชิงแสง

ทวิเสถียรเชิงแสงเกิดขึ้นโดยโครงสร้างเชิงแสงที่สามารถเกิดการสั่นพ้องได้ ซึ่งทวิเสถียรเชิงแสงจะมีลักษณะคือ มีสถานะเอาท์พุทสองสถานะที่ขึ้นกับสถานะอินพุทเดียวกันทวิเสถียรเชิงแสงสามารถแสดงให้เห็นได้ในอุปกรณ์เชิงแสงต่างๆ เช่น เรโซเนเตอร์รูปร่างวงแหวนและ เรโซเนเตอร์แบบเพบริ-เปโรต์ เป็นต้น

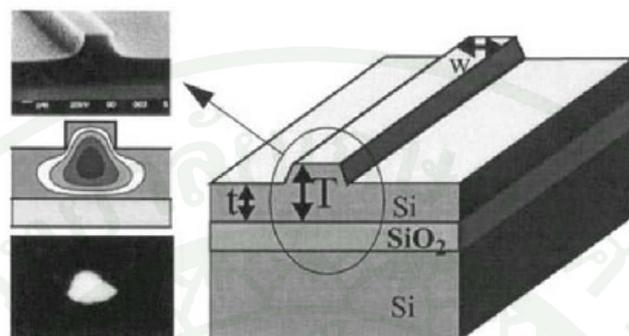
ในปี 1969 Szöke และคณะ ได้ทำการอธิบายทฤษฎีเกี่ยวกับทวิเสถียรเชิงแสงและแสดงการทดลองเป็นครั้งแรกโดยใช้คุณสมบัติการดูดกลืนไม่เชิงเส้น (absorptive nonlinearity) ภายในวัสดุ ในการทำให้เกิดทวิเสถียรเชิงแสงและในปี 1979 Gibbs และ คณะ ได้ทำการทดลองแสดงการเกิดทวิเสถียรเชิงแสงโดยใช้การเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหไม่เชิงเส้นภายในวัสดุ อุปกรณ์เชิงแสงที่ใช้ในการทดลองคือ เรโซเนเตอร์แบบเพบริ-เปโรต์ โดยมีโครงสร้างดังภาพที่ 1(ก) เมื่อ I_1 คือความเข้มแสงตกกระทบเข้าไปในเรโซเนเตอร์ I_1' คือความเข้มแสงที่สะท้อนออกมาจากรีโซเนเตอร์ I_2 และ I_2' คือ ความเข้มแสงที่เดินทางไป-กลับภายในเรโซเนเตอร์ I_3 คือความเข้มแสงที่ส่งผ่านออกมาจากรีโซเนเตอร์

ภาพที่ 1(ข) แสดงลักษณะทวิเสถียรเชิงแสงที่เกิดจากรีโซเนเตอร์แบบเพบริ-เปโรต์ซึ่งมีลักษณะเหมือนรูปตัวอักษร เอส เมื่อ I_1 ตกกระทบที่ศูนย์และเพิ่มความเข้มแสงอย่างช้าๆ เมื่อเพิ่ม I_1 จากศูนย์จนถึง I_h นั่นคือกราฟจากจุด a ไปจุด b ความเข้มแสงเอาท์พุทจะกระโดดขึ้นไปยังจุด c และเพิ่มขึ้นต่อจนถึงจุด d จากจุด d เมื่อลดความเข้มแสง I_1 อย่างช้าๆจนถึง I_l นั่นคือกราฟจากจุด d ไปจุด e ความเข้มแสงเอาท์พุทจะกระโดดลงไปยังจุด f และลดลงจนเป็นศูนย์



ภาพที่ 1 (ก) แผนภาพโครงสร้างของเรโซเนเตอร์เฟบริ-เปโรต์(ข) ลักษณะของทวิเสถียรเชิงแสงของเรโซเนเตอร์แบบเฟบริย์-เพรอต

ซิลิกอนบนแผ่นฉนวน



ภาพที่ 2 แสดง โครงสร้างของซิลิกอนบนแผ่นฉนวนแบบสัน (rib waveguide)

ที่มา: Agrawal (2007)

จากภาพที่ 2 แสดง โครงสร้างของซิลิกอนบนแผ่นฉนวนซึ่งประกอบด้วยชั้นของซิลิกอน (ชั้นล่าง) ซิลิกอนไดออกไซด์ (ชั้นกลาง) และซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นสัน (ชั้นบน) โดยในส่วนของสันของซิลิกอนมีดัชนีหักเหประมาณ 3.5 เป็นส่วนที่ใช้อินพุตแสงและทำหน้าที่เป็นท่อนำคลื่นเพื่อใช้ในการส่งผ่านแสง (Agrawal., 2007)

ปรากฏการณ์ไม่เชิงเส้นที่เกิดขึ้นภายในเรโซเนเตอร์ชนิดซิลิกอน

1. ปรากฏการณ์เคอร์ คือ ปรากฏการณ์สนามไฟฟ้ากำลังที่สองในการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหจริงของระบบ เป็นผลทำให้ดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้ากำลังสองเป็นไปตามสมการ

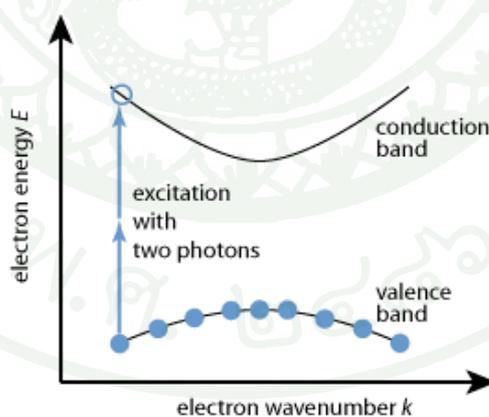
$$\Delta n = s_{33} n_0 \frac{E^2}{2} \quad (1)$$

เมื่อ Δn คือ การเปลี่ยนของดัชนีค่าจริงในระบบ s_{33} คือ สัมประสิทธิ์ของเคอร์ n_0 คือ ดัชนีหักเหปกติของระบบและ E คือสนามไฟฟ้าภายในระบบ (Graham *et al.*, 2004)

2. การดูดกลืนสองโฟตอนคือ กระบวนการในการดูดกลืนโฟตอนสองโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากันของอิเล็กตรอนหรือไอออนสำหรับเปลี่ยนสถานะสู่สถานะที่สูงขึ้น กระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการไม่เชิงเส้นเกิดขึ้นได้ในกรณีที่ระบบความเข้มแสงสูง เพราะการดูดกลืนสองโฟตอนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสงกำลังสมการที่ 2 (Encyclopedia.,2011)

$$\alpha = \beta I \quad (2)$$

ในสารกึ่งตัวนำการดูดกลืนสองโฟตอนจะเกิดขึ้นเฉพาะกรณีที่พลังของโฟตอนมีค่าน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของช่องว่างระหว่าง (band gap) แถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบคอนดักชัน (conduction band) ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แสดงปรากฏการณ์การดูดกลืนสองโฟตอนที่เกิดขึ้นภายในสารกึ่งตัวนำ

ที่มา: Encyclopedia (2011)

จากภาพที่ 3 แสดงลักษณะการเกิดการดูดกลืนสองโฟตอนภายในสารกึ่งตัวนำ โดย อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบคอนดักชัน ด้วยการดูดกลืน โฟตอนสองโฟตอนทำให้ระบบเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลนำไปสู่ปรากฏการณ์ของพาหะอิสระต่อไป

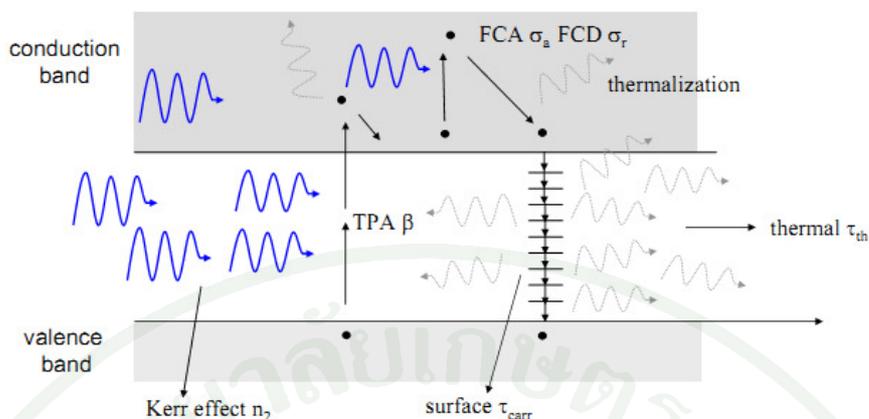
3. ปรากฏการณ์พาหะอิสระเป็นผลมาจากอิเล็กตรอนถูกกระตุ้นด้วยการดูดกลืนสองโฟตอนทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลอิสระหรือพาหะอิสระ พาหะอิสระที่เกิดขึ้นในระบบจะทำการดูดกลืนแสงที่เข้าไปในระบบซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในซิลิกอนและผลจากพาหะอิสระยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหในส่วนของจำนวนจินตภาพ (Graham *et al.*, 2004)

4. ปรากฏการณ์แสงเชิงความร้อนมีสาเหตุจากการเพิ่มสนามไฟฟ้าและปรากฏการณ์พาหะอิสระเป็นผลทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในซิลิกอนและความร้อนที่เกิดขึ้นส่งผลต่อดัชนีหักเหของซิลิกอนดังสมการที่ 3

$$\frac{dn}{dT} = 1.86 \times 10^{-4} / K \quad (3)$$

ดังนั้นถ้าท่อนำคลื่นซิลิกอนมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องประมาณ 6 องศาเซลเซียส จะมีผลทำให้ดัชนีหักเหของท่อนำคลื่นซิลิกอนเปลี่ยนไป 1.1×10^{-3} เพราะฉะนั้นจำเป็นต้องมีการควบคุมอุณหภูมิบริเวณโดยรอบท่อนำคลื่นซิลิกอนเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเห (Graham *et al.*, 2004)

มีผลการทดลองที่น่าสนใจว่าผลจากอุณหภูมิมีผลทำให้ดัชนีหักเหของซิลิกอนเปลี่ยนแปลงในทางบวกและผลจากพาหะอิสระมีผลทำให้ดัชนีหักเหของซิลิกอนลดลงดังนั้นจึงสามารถนำทั้งสองปรากฏการณ์ข้างต้นมาใช้ในการควบคุมค่าดัชนีหักเหของซิลิกอน (Graham *et al.*, 2004)



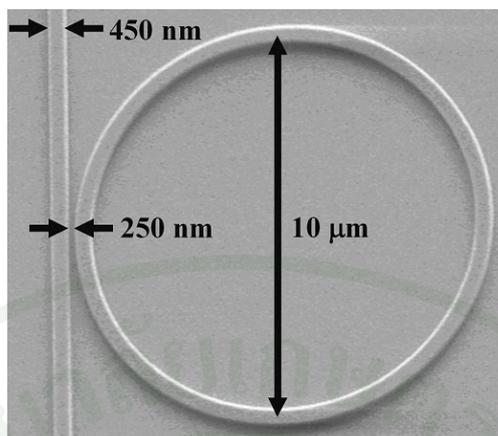
ภาพที่ 4 ปรากฏการณ์ไม่เชิงเส้นภายในเรโซเนเตอร์ชนิดซิลิกอน

ที่มา: Priem *et al.* (2005)

ภาพที่ 4 เมื่อแสงเดินทางเข้าไปในซิลิกอนจะทำให้เกิดการดูดกลืนสองโฟตอนขึ้น และส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหหรือเกิดปรากฏการณ์เคอร์รี่ในวัสดุ จากผลของการดูดกลืนสองโฟตอนทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นทำให้เกิดพาหะอิสระขึ้นและอิเล็กตรอนอิสระได้ดูดกลืนแสงที่เข้ามาในวัสดุและเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหของแสงทำให้เกิดการกระจายแสงเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนอิสระกลับสู่สถานะพื้นจะทำให้เกิดการคายพลังงานอยู่ในรูปของโฟนอนส่งผลให้เกิดความร้อนในระบบนำไปสู่ปรากฏการณ์แสงเชิงความร้อนขึ้นเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเห (Priem *et al.*, 2005)

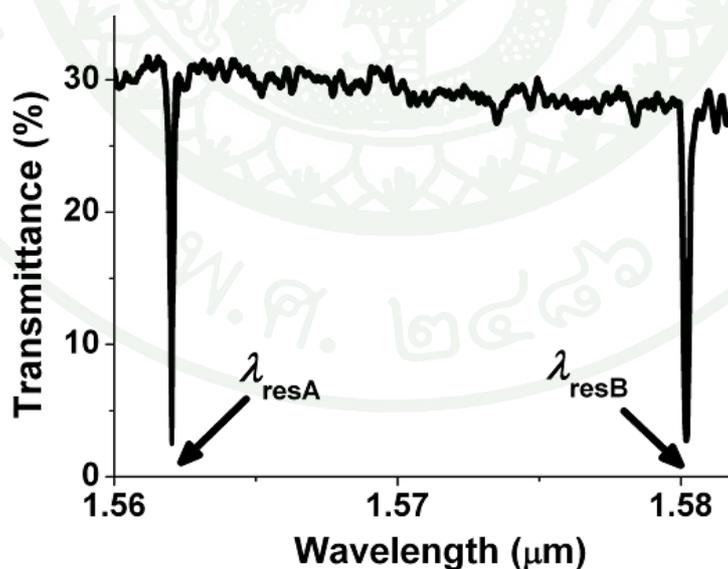
เรโซเนเตอร์แบบวงแหวนที่มีการเชื่อมต่อหนึ่งครั้ง (One-coupler ring resonator)

ในปี ค.ศ. 2004 Michal Lipson และ Vilson R. Almeida ทำการทดลองทวิเสถียรเชิงแสงในเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนขนาดไมโครที่ทำจากซิลิกอนบนฉนวนที่มีการเชื่อมต่อหนึ่งครั้งเป็นครั้งแรกดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แสดงภาพมูมบนของเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนซิลิกอน รัศมี 5 ไมโครเมตร

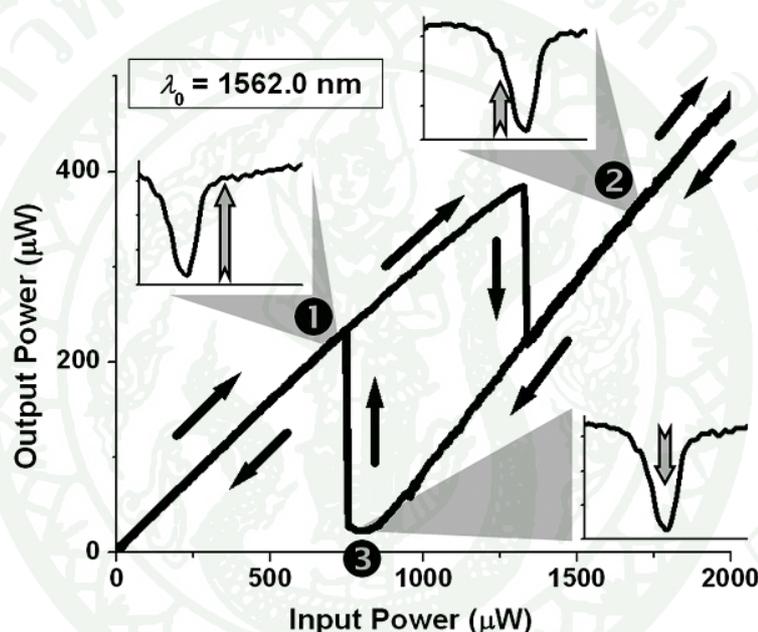
ภาพที่ 5 แสดงภาพมูมบนของเรโซเนเตอร์รัศมี 5 ไมโครเมตร โดยทำขึ้นจาก ซิลิกอนบนฉนวน ในส่วนของท่อนำคลื่นเส้นตรงมีความกว้างตัดขวาง 450 นาโนเมตร ห่างจากท่อนำคลื่นวงแหวน 250 นาโนเมตร เมื่อนำเรโซเนเตอร์มาวัดเพื่อหาสเปกตรัมส่งผ่าน (transmittance spectrum) และความยาวคลื่นสั้นพ้องของเรโซเนเตอร์นี้ได้ผลดังภาพที่



ภาพที่ 6 แสดงสเปกตรัมส่งผ่านของเรโซเนเตอร์วงแหวนซิลิกอนและแสดงความยาวคลื่นสั้นพ้อง

สองค่าคือ $\lambda_{resA} = 1561.87$ นาโนเมตรและ $\lambda_{resB} = 1580.04$ นาโนเมตร

ภาพที่ 6 แสดงสเปกตรัมของการส่งผ่านของเรโซเนเตอร์และแสดงความยาวคลื่นสั้นพ้องสองค่าคือ $\lambda_{resA} = 1561.87$ นาโนเมตรและ $\lambda_{resB} = 1580.04$ นาโนเมตร ในการแสดงทวิเสถียรที่เกิดขึ้นจากเรโซเนเตอร์ที่มีการเชื่อมต่อหนึ่งครั้งใช้หลักการการเลื่อนไปของความยาวคลื่นสั้นพ้องเมื่ออินพุตสนามไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงกับความยาวคลื่นสั้นพ้องคือ $\lambda_0 = 1562.0$ นาโนเมตร และเพิ่มกำลังอินพุตมากขึ้น ซึ่งเป็นผลทำให้ความยาวคลื่นสั้นพ้องเลื่อนไปทางขวาของกราฟจนเท่ากับความยาวคลื่นอินพุต



ภาพที่ 7 กราฟทวิเสถียรเชิงแสงของเรโซเนเตอร์แบบวงแหวน รัศมี 5 ไมโครเมตร ความยาวคลื่น 1,562 นาโนเมตร เครื่องหมายบนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของสเปกตรัมส่งผ่านคือ 1. สเปกตรัมสั้นพ้องยังไม่มีเกิดการเลื่อนเกิดขึ้นที่ตำแหน่งก่อนถึงวงฮิสเทอรีซิส 2. สเปกตรัมสั้นพ้องเกิดการเลื่อนไปสัมพันธ์กับกำลังที่เพิ่มขึ้น 3. สเปกตรัมสั้นพ้องเลื่อนถึงตำแหน่งเดียวกันกับความยาวคลื่นอินพุต

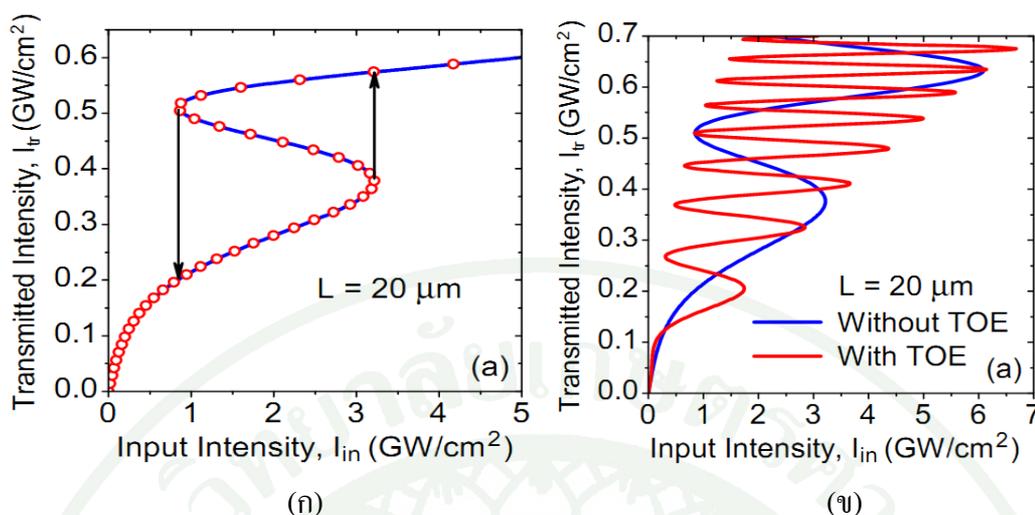
ภาพที่ 7 แสดงการเกิดทวิเสถียรเชิงแสงภายในเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนซิลิกอนที่มีการเชื่อมต่อหนึ่งครั้ง เมื่ออินพุตความยาวคลื่น $\lambda_0 = 1562.0$ ซึ่งมีความยาวคลื่นมากกว่าความยาวคลื่นสั้นพ้องของเรโซเนเตอร์เมื่อเพิ่มกำลังของสนามไฟฟ้าขึ้นเรื่อยๆจนถึง จุดที่ 1 คือตำแหน่งก่อนถึงวง

ฮิสเทอรีซิสความยาวคลื่นอินพุตยังคงมีความยาวมากกว่าความยาวคลื่นสั้นพ้องของเรโซเนเตอร์ จากนั้นทำการเพิ่มกำลังของสนามไฟฟ้าอินพุตจนกระทั่งถึงจุดที่ 2 ความยาวคลื่นสั้นพ้องของเรโซเนเตอร์จะมีความยาวมากกว่าความยาวคลื่นอินพุตและเคลื่อนผ่านวงฮิสเทอรีซิสแล้วจากนั้นทำการลดกำลังของสนามไฟฟ้าอินพุตจนกระทั่งถึงจุดที่ 3 ความยาวคลื่นสั้นพ้องของเรโซเนเตอร์จะเลื่อนกลับมาตรงกับความยาวคลื่นอินพุตทำให้ระบบเกิดการสั่นพ้องเกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นเดียวกันกับความยาวคลื่นอินพุตเป็นผลทำให้กำลังเอาต์พุตของสนามไฟฟ้ากระโดดเพิ่มขึ้นจากค่าน้อยไปยังค่ามากอย่างรวดเร็ว

การศึกษาทฤษฎีเชิงวิเคราะห์ของทวีเสถียรเชิงแสงในเรโซเนเตอร์แบบเฟบริ-เปโรต์

ในปี ค.ศ. 2009 Ivan D. Rukhlenko และคณะ ได้พัฒนาทฤษฎีเชิงวิเคราะห์สำหรับอธิบายปรากฏการณ์ไม่เชิงเส้นของทวีเสถียรเชิงแสงภายในเรโซเนเตอร์แบบเฟบริ-เปโรต์จากทฤษฎีได้แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของพาหะอิสระที่มีต่อทวีเสถียรเชิงแสง 2 ข้อคือ 1. ผลจากการดูดกลืนของพาหะอิสระทำให้ความเข้มแสงส่งผ่าน (transmitted intensity) เกิดการอิ่มตัว (saturation) และ 2. การแพร่กระจายของพาหะอิสระและปรากฏการณ์แสงเชิงความร้อน จะทำให้เกิดการเลื่อนไปของเฟส

จากภาพที่ 8 แสดงลักษณะทวีเสถียรเชิงแสงที่เกิดจากเรโซเนเตอร์แบบเฟบริ-เปโรต์ซึ่งมีลักษณะเหมือนรูปตัวอักษร เอส ภาพ ก แสดงความสอดคล้องระหว่างกรณีที่ไม่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอน (เส้นทึบ) และกรณีที่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอน (วงกลม) ความยาว 20 ไมโครเมตร ภาพ ข แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของทวีเสถียรเชิงแสงกรณีที่คิดผลของปรากฏการณ์แสงเชิงความร้อนซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าผลของปรากฏการณ์แสงเชิงความร้อนจะทำให้ทวีเสถียรเชิงแสงมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นและวงฮิสเทอรีซิส (hysteresis) มีขนาดแคบลง



ภาพที่ 8 ลักษณะของทวิเสถียรเชิงแสงของเรโซเนเตอร์แบบเฟบริ-เปโรต์ความยาว 20 ไมโครเมตร (ก) เปรียบเทียบผลของการดูดกลืนสองโฟตอนเมื่อไม่คิดผลของปรากฏการณ์แสงเชิงความร้อน (เส้นทึบคือกรณีที่ไม่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอน วงกลมคือกรณีคิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอน) (ข) ผลของปรากฏการณ์แสงเชิงความร้อน

การศึกษาทฤษฎีเชิงวิเคราะห์ของทวิเสถียรเชิงแสงในเรโซเนเตอร์แบบวงแหวน

ในปี ค.ศ. 2010 Ivan D. Rukhlenko และคณะ ได้พัฒนาทฤษฎีเชิงวิเคราะห์สำหรับอธิบายปรากฏการณ์ไม่เชิงเส้นของทวิเสถียรเชิงแสงภายในเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนซิลิกอน รัศมี 5.0 ไมโครเมตร โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงอินพุตกับความเข้มแสงเอาต์พุตในกรณีที่เกิดผลจากการสูญเสียเชิงเส้น ปรากฏการณ์เคอร์ การดูดกลืนสองโฟตอน ผลของอิเล็กตรอนอิสระที่เหนี่ยวนำให้เกิดการดูดกลืนและการกระจายแสง และผลจากแสงเชิงความร้อนภายในเรโซเนเตอร์ จากสมการการเคลื่อนที่ของแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าภายในเรโซเนเตอร์ เมื่อไม่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอน นั่นคือพิจารณากรณีการดูดกลืนสองโฟตอนมีค่าน้อยๆ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการสูญเสียแบบอื่นๆ พบว่าผลของการดูดกลืนของอิเล็กตรอนอิสระทำให้เกิดการอ้อมตัวของความเข้มแสงเอาต์พุต ทวิเสถียรเชิงแสงสามารถควบคุมได้โดยการแปรค่าพารามิเตอร์

ต่างๆ ดังนี้ 1. ความยาวคลื่น 2. ช่วงชีวิตยังผลของอิเล็กตรอนอิสระ (effective free-carrier lifetime)
3) ผลของแสงเชิงความร้อน

เมื่อพิจารณาอันตรกิริยาแบบไม่เชิงเส้นของคลื่นแสงสองคลื่นที่มีความยาวคลื่นต่างกัน (เรียกว่า ปั๊ม (pump) และสัญญาณ (signal)) ภายในท่อนำคลื่นซิลิกอน ขณะที่คลื่นทั้งสองเคลื่อนที่ภายในท่อนำคลื่น ได้เหนี่ยวนำท่อนำคลื่นทำให้เกิดโพลาไรซ์ (polarization) $P(r,t)$ ซึ่งโพลาไรซ์นี้ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า $E(r,t)$ เป็นไปตามสมการคลื่นของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation) ดังสมการที่ 4 (Rukhlenko *et al.*, 2010)

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{1}{\epsilon_0 c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (4)$$

เมื่อ ϵ_0 สภาพการยอมได้ในสุญญากาศ (permittivity of vacuum) และ c คือความเร็วแสงในสุญญากาศ (speed of light in vacuum)

โพลาไรซ์ของแสงที่เคลื่อนที่ในซิลิกอนสามารถเขียนในรูปของผลบวกในส่วนที่เป็นเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นคือ $P(r,t) = P_L(r,t) + P_{NL}(r,t)$ (Lin *et al.*, 2007) เมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าของทั้งสองคลื่นแสงที่เคลื่อนที่ในท่อนำคลื่นซิลิกอนดังสมการที่ 5

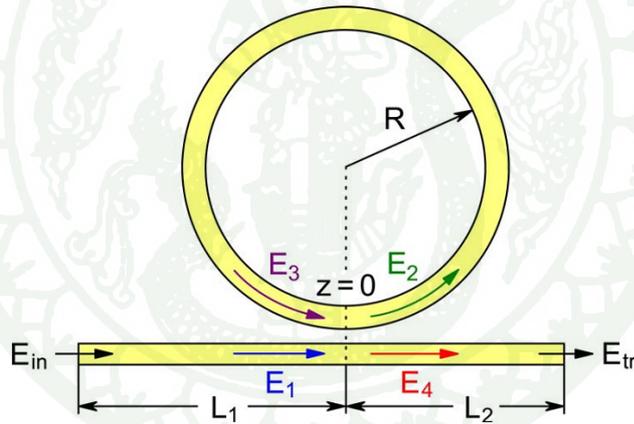
$$E(r,t) = s_p(z)F_p(r)A_p(z,t)\exp[i(\beta_{0p}z - \omega_p t)] + s_s(z)F_s(r)A_s(z,t)\exp[i(\beta_{0s}z - \omega_s t)] + c.c. \quad (5)$$

เมื่อ $s_u = \left[\frac{(\mu_0 / \epsilon_0)^{1/2}}{2n_0 A_{effu}(z)} \right]^{1/2}$ เมื่อ u สามารถแทนได้ทั้ง p หรือ s และ A_{effu} คือ พื้นที่รูปแบบยังผล

(effective mode area) จากสมการที่ 5 เมื่อนำไปแทนในสมการที่ 1 แล้วทำการจัดรูปทำให้ได้สมการทั่วไปที่ใช้อธิบายสนามไฟฟ้าสองคลื่นที่เคลื่อนที่ภายในท่อนำคลื่นซิลิกอนดังสมการที่ 6

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_p}{\partial z} + \beta_{1p} \frac{\partial A_p}{\partial t} + \frac{i\beta_{2p}}{2} \frac{\partial^2 A_p}{\partial t^2} = \\ -\frac{\alpha_p}{2} A_p + i(\gamma_{pp}|A_p|^2 + 2\gamma_{ps}|A_s|^2) A_p \\ -\frac{\sigma_p}{2} (1+i\mu_p) N A_p + i\gamma_p A_s \int_{-\infty}^t h(t-t') A_s^*(z,t') A_p(z,t') e^{i\Omega_{ps}(t-t')} dt' \end{aligned} \quad (6a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_s}{\partial z} + \beta_{1s} \frac{\partial A_s}{\partial t} + \frac{i\beta_{2s}}{2} \frac{\partial^2 A_s}{\partial t^2} = \\ -\frac{\alpha_s}{2} A_s + i(\gamma_{ss}|A_s|^2 + 2\gamma_{sp}|A_p|^2) A_s \\ -\frac{\sigma_s}{2} (1+i\mu_s) N A_s + i\gamma_s A_p \int_{-\infty}^t h(t-t') A_p^*(z,t') A_s(z,t') e^{i\Omega_{sp}(t-t')} dt' \end{aligned} \quad (6b)$$



ภาพที่ 9 (ก) แผนภาพโครงสร้างของเรโซเนเตอร์แบบวงแหวน (ข) ทวิเสถียรเชิงแสงกรณีที่ไม่คิดผลของการคูกคลื่นสองโฟตอน (เส้นทึบ) และกรณีคิดผลของการคูกคลื่นสองโฟตอน (วงกลม)

จากสมการที่ 6 เมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าต่อเนื่องความถี่เชิงมุม ω หนึ่งคลื่น ($A_s = 0$) โดยไม่ขึ้นกับเวลา ($t = 0$) เคลื่อนที่ในเรโซเนเตอร์ไม่เชิงเส้นรูปวงแหวนดังแสดงในภาพที่ 9 โดยส่วนของเส้นตรง และวงแหวนรัศมี R ผลิตจากท่อนำคลื่นชนิด SOI สมการทั่วไปที่ใช้อธิบายการ

เปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า $E(z)$ ในเรโซเนเตอร์สามารถเขียนได้ใหม่ดังสมการที่ 7 (Rukhlenko *et al.*, 2010)

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dz} = -\frac{\alpha}{2} - \left(\frac{\beta}{2} - i\gamma \right) |A|^2 - \left(\frac{\xi_r}{2} - i\xi_i \right) |A|^4 \quad (7)$$

เมื่อ $A(z)$ คือ แอมพลิจูดเชิงซ้อนของสนามไฟฟ้า $E(z) = \mathcal{A}A(z)\exp(i\beta_0 z)$; $\mathcal{A} = (\mu_0 / \epsilon_0)^{1/4} (2n_0)^{1/2}$ โดยที่ μ_0 คือสภาพการซึมได้ (intrinsic permeability) n_0 คือดัชนีหักเหเชิงเส้น (linear refractive index) $\beta_0 = n_0 k$ คือ ค่าคงที่การแพร่กระจาย (propagation constant) เมื่อ $k = \omega/c$ พารามิเตอร์ที่ใช้ในสมการที่ 7 คือ การสูญเสียเชิงเส้น (α) การดูดกลืนสองโฟตอน (β) และปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr effect: $\gamma = kn_2$) เมื่อ n_2 คือพารามิเตอร์ไม่เชิงเส้นเคอร์ (nonlinear Kerr parameter) สัมประสิทธิ์อิเล็กตรอนอิสระ ξ_r และ ξ_i เป็นดังสมการที่ 8

$$\xi_r = (1.45 \times 10^{-21} \text{ m}^2) \left(\frac{\lambda}{1.55 \times 10^{-6} \text{ m}} \right)^2 \frac{\tau_{eff} \beta \lambda}{2hc} \quad (8a)$$

$$\xi_i = (5.3 \times 10^{-27} \text{ m}^3) \left(\frac{\lambda}{1.55 \times 10^{-6} \text{ m}} \right)^2 \frac{\tau_{eff} \beta}{2hc} - \frac{k\beta\kappa\mathcal{G}}{C\rho} \quad (8b)$$

เมื่อ τ_{eff} คือ ช่วงชีวิตอิเล็กตรอนอิสระยังผล และ h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) พจน์ที่สองของสมการที่ (8b) คือ พจน์ที่พิจารณาผลของปรากฏการณ์แสงเชิงความร้อน κ , \mathcal{G} , C , และ ρ คือ สัมประสิทธิ์แสงเชิงความร้อน เวลาในการสลายตัวเชิงความร้อน ความจุความร้อนและความหนาแน่นของซิลิกอนตามลำดับ ในกรณีที่เราไม่พิจารณาผลของปรากฏการณ์แสงเชิงความร้อน พจน์ที่สองของสมการที่ (8b) จะถูกตัดออก

ในพจน์ที่สองของสมการที่ (7) สามารถที่จะประมาณให้มีค่าน้อยมากๆได้เมื่อเทียบกับพจน์ของการดูดกลืนของพาหะอิสระ ในกรณีแสงป้อนคลื่นต่อเนื่อง การประมาณในสมการที่ (7) สามารถหาผลเฉลยได้โดยที่ $A(z) = \sqrt{I(z)} \exp[i\phi(z)]$ จะได้ผลเฉลยคือ

$$I(z) = \frac{I_0 \exp(-\alpha z)}{\sqrt{1 + I_0^2 (\xi_r / \alpha) [1 - \exp(-2\alpha z)]}} \quad (9a)$$

$$\phi(z) = \phi_0 + \gamma I_0 L_{eff}(z) - \frac{\xi_i}{\xi_r} \left(\ln \frac{I_0}{I(z)} - \alpha z \right) \quad (9b)$$

$$L_{eff}(z) = \frac{\tan^{-1} [I_0 \sqrt{\xi_r / \alpha}] - \tan^{-1} [I(z) \sqrt{\xi_r / \alpha}]}{[I_0 \sqrt{\alpha \xi_r}]} \quad (9c)$$

เมื่อ I_0 และ ϕ_0 คือความเข้มแสงและเฟสที่ $z=0$ และ L_{eff} คือความยาวยังผลทั่วไป

สมการที่ (9a), (9b) และ (9c) คือสมการผลเฉลยที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าทั้งในเรโซเนเตอร์เส้นตรงและเรโซเนเตอร์รูปวงแหวนในภาพที่ 9

สมมติให้แสงที่เคลื่อนที่ในท่อนำคลื่นรูปวงแหวนและเส้นตรงมารวมกันที่จุด $z=0$ จะได้ความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าดังนี้
ที่จุดเชื่อมต่อ

$$E_4 = rE_1 + itE_3 \quad (10)$$

$$E_2 = itE_1 + rE_3 \quad (11)$$

$$E_3 = E(2\pi R) \quad (12)$$

เมื่อ $r^2 + t^2 = 1$ โดย r คือ ค่าคงที่ส่งผ่าน เมื่อแทนสมการที่ (12) ลงไปในสมการที่ (10) และ (11) จากนั้นทำการจัดรูปสมการ โดยกำหนด $I_4 = |E_4|^2 / \varpi^2$, $I(2\pi R) = |E(2\pi R)|^2 / \varpi^2$ และ $I_0 = |E_2|^2 / \varpi^2$ จะได้ว่า

$$I_4 = [r^2 I_0 + I(2\pi R) - 2r \sqrt{I_0 I(2\pi R)} \cos \Delta\phi] / (1 - r^2) \quad (13)$$

เมื่อ $\Delta\phi = 2\pi\beta R + \phi(2\pi R) - \phi_0$ คือเฟสที่เลื่อนไปเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน

$$I_1 = I_0 + I_4 - I(2\pi R) \quad (14)$$

สมการที่ (13) และ (14) คือความเข้มแสงอินพุตและเอาต์พุตที่จุดเชื่อมระหว่างส่วนที่เป็นรูปวงแหวนและส่วนที่เป็นเส้นตรงของแต่ละด้านของเรโซเนเตอร์ ถ้า L_1 และ L_2 คือความยาวของเรโซเนเตอร์ในส่วนที่เป็นเส้นตรงจากตำแหน่งก่อนและหลังจุดเชื่อมต่อดังภาพที่ 9 ความเข้มแสงที่อินพุตและเอาต์พุตที่จุดปลายของแต่ละด้านของเรโซเนเตอร์สามารถหาได้โดยนำสมการที่ (13) และ (14) แทนลงในสมการที่ (9a) จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$I_{in}(I_0) = \frac{I_1(I_0) \exp(\alpha L_1)}{\sqrt{1 + I_1^2(I_0) (\xi_r / \alpha) [1 - \exp(2\alpha L_1)]}} \quad (15)$$

$$I_{tr}(I_0) = \frac{I_4(I_0) \exp(-\alpha L_2)}{\sqrt{1 + I_4^2(I_0) (\xi_r / \alpha) [1 - \exp(-2\alpha L_2)]}} \quad (16)$$

สมการที่ (15) และ (16) คือสมการที่ใช้อธิบายความเข้มแสงอินพุตและเอาต์พุตที่จุดปลายของแต่ละด้านของเรโซเนเตอร์ในกรณีที่ไม่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอน โดย I_{in} คือความเข้มแสงอินพุต (E_{in}) I_{tr} คือความเข้มแสงเอาต์พุตที่ช่องธรู (Through) (E_{tr})

ในกรณีที่พิจารณาผลของปรากฏการณ์คู่คลื่นสองโพตอน ซึ่งผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) ของสมการที่ (7) อยู่ในรูปของสมการ โดยปริยาย (implicit form) ดังสมการที่ (17a), (17b) และ (17c) (Rukhlenko et al., 2010)

$$2\alpha z + \beta I_0 L_{eff}(z) = \ln \left[\frac{(\alpha I^{-2}(z) + \beta I^{-1}(z) + \xi_r)}{\alpha I_0^{-2} + \beta I_0^{-1} + \xi_r} \right] \quad (17a)$$

$$\phi(z) = \phi_0 + \mathcal{M}_0 L_{eff}(z) - \frac{\xi_i}{\xi_r} \left[\ln \frac{I_0}{I(z)} - \alpha z - \frac{\beta}{2\gamma} L_{eff}(z) \right] \quad (17b)$$

$$L_{eff}(z) = \frac{q}{\beta I_0} \ln \left[\frac{qK(z)+1}{qK(z)-1} \frac{qK(0)-1}{qK(0)+1} \right] \quad (17c)$$

เมื่อ $q = (1 - 4\alpha\xi/\beta^2)^{-1/2}$ และ $K(z) = 1 + 2(\xi_r/\beta)I(z)$ สมการที่ (17) สามารถหาผลเฉลยได้ โดยใช้ทฤษฎีวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) ด้วยระเบียบวิธีแบ่งครึ่งช่วง (Bisection method) ความเข้มแสงอินพุตและเอาต์พุตที่จุดปลายของแต่ละด้านของเรโซเนเตอร์สามารถหาได้โดยนำสมการที่ (13) และ (14) แทนลงในสมการที่ (17a) ได้สมการดังนี้

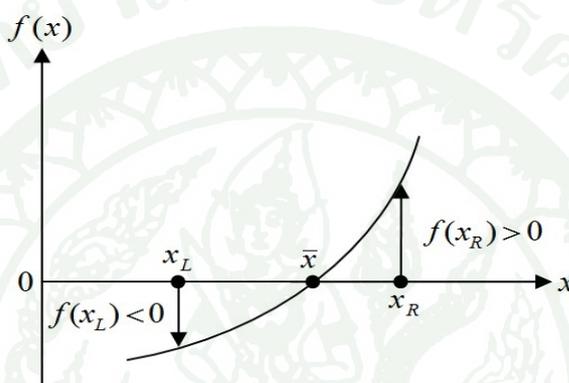
$$-2\alpha z + \beta I_1(I_0) L_{eff}(z) = \ln \left[\frac{(\alpha I_{in}^{-2}(I_0) + \beta I_{in}^{-1}(I_0) + \xi_r)}{\alpha I_1^{-2}(I_0) + \beta I_1^{-1}(I_0) + \xi_r} \right] \quad (18)$$

$$2\alpha z + \beta I_4(I_0) L_{eff}(z) = \ln \left[\frac{(\alpha I_{tr}^{-2}(I_0) + \beta I_{tr}^{-1}(I_0) + \xi_r)}{\alpha I_4^{-2}(I_0) + \beta I_4^{-1}(I_0) + \xi_r} \right] \quad (19)$$

สมการที่ (18) และ (19) คือสมการที่ใช้อธิบายความเข้มแสงอินพุตและเอาต์พุตที่จุดปลายของแต่ละด้านของเรโซเนเตอร์ในกรณีที่คิดผลของการคู่คลื่นสองโพตอน โดย I_{in} คือความเข้มแสงอินพุตที่ปลายที่ 1 (E_{in}) I_{tr} คือความเข้มแสงเอาต์พุตที่ช่องธนู (E_{tr})

ระเบียบวิธีแบ่งครึ่งช่วง

การหาผลเฉลยของสมการ โดยระเบียบวิธีแบ่งครึ่งช่วง ใช้หลักความเป็นจริงที่ว่า ฟังก์ชัน $f(x)$ จะมีเครื่องหมายตรงข้ามในขณะที่ x มีค่าน้อยกว่าและมากกว่าค่าของผลเฉลย \bar{x} ที่แท้จริง ดังเช่นภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ระเบียบวิธีแบ่งครึ่งช่วงเพื่อใช้หารากของสมการ $f(x) = 0$

ที่มา: ปราโมทย์ (1995)

ภาพที่ 10 นี้แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชัน $f(x)$ จากการที่มีค่าเป็นลบที่ $x = x_L$ ซึ่งอยู่ทางด้านซ้ายมือของผลเฉลย \bar{x} ไปเป็นค่าบวกที่ $x = x_R$ ทางด้านขวาของผลเฉลย \bar{x} นั่นคือ ผลเฉลย \bar{x} อยู่ระหว่าง x_L และ x_R ที่กำหนดไว้แล้วค่าฟังก์ชัน $f(x_L)$ และ $f(x_R)$ จะมีเครื่องหมายตรงข้ามกันเสมอ

การคำนวณหาค่าผลเฉลย \bar{x} ด้วยระเบียบวิธีแบ่งครึ่งช่วงประกอบด้วยหลักการในภาพรวมคือการบีบช่วงระหว่าง x_L และ x_R ให้แคบลงเรื่อยๆ ด้วยการแบ่งครึ่งช่วงที่ละครั้งดังกล่าว โดยในขณะเดียวกันนั้นก็ทำการตรวจสอบว่าราก \bar{x} นั้นยังคงอยู่ในช่วงระหว่าง x_L และ x_R เสมอ โดย

การหาค่าฟังก์ชัน $f(x_L)$ และ $f(x_R)$ ที่จำเป็นต้องมีเครื่องหมายตรงข้ามกัน การคำนวณหาค่าผลเฉลย \bar{x} ด้วยระเบียบวิธีแบ่งครึ่งช่วงมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 หาค่าเฉลี่ย x_M จาก x_L และ x_R ที่กำหนด

$$x_M = \frac{x_R + x_L}{2} \quad (20)$$

แล้วจึงคำนวณค่าฟังก์ชันดังกล่าวที่ตำแหน่ง x_M นี้ ค่า $f(x_M)$ ที่คำนวณได้จะเป็นไปได้ 2 กรณี คือ มีค่าเป็นบวก (กรณี (ก)) และมีค่าเป็นลบ (กรณี (ข)) ขึ้นอยู่กับค่า x_L และ x_R ที่กำหนด

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณผลคูณระหว่าง $f(x_M)$ และ $f(x_R)$ หาก $f(x_M) \cdot f(x_R) > 0$ หมายถึง ผลที่เกิดขึ้นเป็นกรณี (ก) ดังนั้น ผลเฉลยจะอยู่ในช่วง $x_L < \bar{x} < x_M$ และหาก $f(x_M) \cdot f(x_R) < 0$ หมายถึง ผลที่เกิดขึ้นเป็นกรณี (ข) ดังนั้น ผลเฉลยจะอยู่ในช่วง $x_M < \bar{x} < x_L$

ขั้นตอนที่ 3 ปรับค่า x_L หรือ x_R ใหม่เพื่อบีบช่วงดังกล่าวให้แคบลง หากผลที่เกิดขึ้นเป็นกรณี (ก) ให้ปรับค่า x_R ใหม่ให้เท่ากับ x_M และหากผลที่เกิดขึ้นเป็นกรณี (ข) ให้ปรับค่า x_L ใหม่ให้เท่ากับ x_M

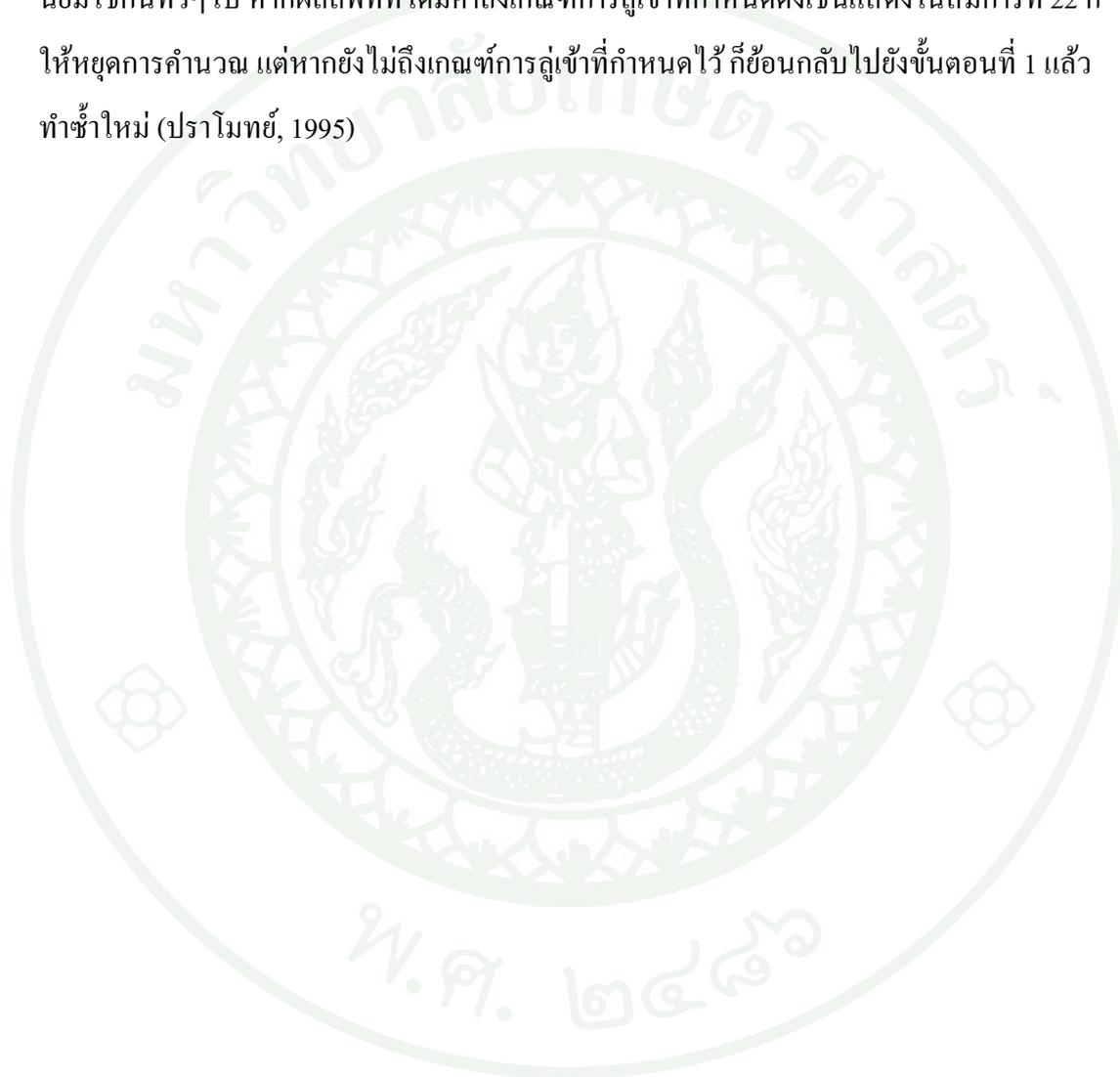
ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบผลลัพธ์นั้นได้ลู่เข้าถึงเกณฑ์ (convergence criterion) ที่กำหนดไว้แล้วหรือไม่ เกณฑ์ดังกล่าวอาจอยู่ในรูปแบบเช่น

$$|f(x_M)| < \varepsilon \quad (21)$$

โดย ε เป็นค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ (tolerance) หรืออาจใช้

$$\left| \frac{x_R^{new} - x_R^{old}}{x_R^{new}} \right| \times 100\% < \varepsilon_s \quad (22)$$

โดย ε_s แทนค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้เพื่อหยุดการคำนวณ (stopping tolerance) เช่น 0.05% ซึ่งนิยมใช้กันทั่วไป หากผลลัพธ์ที่ได้มีค่าถึงเกณฑ์การลู่เข้าที่กำหนดดังเช่นแสดงในสมการที่ 22 ก็ให้หยุดการคำนวณ แต่หากยังไม่ถึงเกณฑ์การลู่เข้าที่กำหนดไว้ ก็ย้อนกลับไปยังขั้นตอนที่ 1 แล้วทำซ้ำใหม่ (ปราโมทย์, 1995)



อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการคำนวณ

1. คอมพิวเตอร์
2. โปรแกรม Matlab

วิธีการ

1. เขียนแผนภาพโครงสร้างของเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนที่มีการเชื่อมต่อสองครั้ง

เขียนแผนภาพเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนที่มีการเชื่อมต่อสองครั้ง โดยการเขียนแผนภาพของท่อนำคลื่นเส้นตรงเพิ่มขึ้นบริเวณด้านบนของภาพที่ 4 และเขียนเส้นทางการเปลี่ยนแปลงไปของสนามไฟฟ้า ณ จุดต่างๆในแผนภาพ

2. ศึกษาลักษณะของทวิเสถียรเชิงแสงในกรณีไม่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอนและไม่คิดผลของแสงเชิงความร้อน

2.1 วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าในเรโซเนเตอร์รูปวงแหวนที่มีการเชื่อมต่อสองครั้งจากแผนภาพที่ได้ในวิธีการข้อที่ 1 และหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงของสนามไฟฟ้าอินพุตและสนามไฟฟ้าเอาต์พุตของเรโซเนเตอร์

2.2 จากสมการที่ได้ในข้อ 2.1 นำมาแทนในสมการที่ 9a, 9b และ 9c จากนั้นนำสมการที่ได้มาเขียนกราฟเพื่อศึกษาลักษณะของทวิเสถียรเชิงแสงในกรณีไม่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอนและไม่คิดผลของแสงเชิงความร้อน

3. ศึกษาลักษณะของทวิเสถียรเชิงแสงในกรณีคิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอนแต่ไม่คิดผลของแสงเชิงความร้อน

3.1 วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าในเรโซเนเตอร์รูปร่างวงแหวนที่มีการเชื่อมต่อสองครั้งจากแผนภาพที่ได้ในวิธีการข้อที่ 1 และหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงของสนามไฟฟ้าอินพุตและสนามไฟฟ้าเอาต์พุตของเรโซเนเตอร์

3.2 จากสมการที่ได้ในข้อ 2.1 นำมาแทนในสมการที่ 17a, 17b และ 17c จากนั้นนำสมการที่ได้มาเขียนกราฟด้วยทฤษฎีแบ่งครึ่ง เพื่อศึกษาลักษณะของทวิเสถียรเชิงแสงในกรณีคิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอนแต่ไม่คิดผลของแสงเชิงความร้อน

4. เปรียบเทียบผลที่ได้จากกรณีที่ไม่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอนและกรณีที่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอนโดยทั้งสองกรณีไม่คิดผลของแสงเชิงความร้อน

จากผลที่ได้ในข้อ 2.2 และ 3.2 นำมาเปรียบเทียบเพื่อศึกษาผลของการดูดกลืนสองโฟตอนที่ติดต่อทวิเสถียรเชิงแสง

5. ศึกษาอิทธิพลของความยาวคลื่นที่มีผลต่อทวิเสถียรเชิงแสงในเรโซเนเตอร์รูปร่างวงแหวนชนิดซิลิกอนบนฉนวน

ศึกษาผลของความยาวคลื่นที่มีต่อทวิเสถียรเชิงแสงจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงอินพุตและความเข้มแสงเอาต์พุตในวิธีการข้อที่ 2.2 โดยการเปลี่ยนความยาวคลื่นเป็น 1550, 1545 และ 1540 นาโนเมตร

6. ศึกษาอิทธิพลของช่วงชีวิตของพาหะอิสระที่มีผลต่อทวิเสถียรเชิงแสงในเรโซเนเตอร์รูปวงแหวน ชนิดซิลิกอนบนฉนวน

ศึกษาผลของช่วงชีวิตของพาหะอิสระที่มีผลต่อทวิเสถียรเชิงแสงจากกราฟแสดง ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงอินพุตและความเข้มแสงเอาต์พุตทั้งสองช่องในวิธีการข้อที่ 2.2 โดยการเปลี่ยนเวลาช่วงชีวิตของพาหะอิสระเป็น 0.45, 0.975 และ 2.15 นาโนวินาที

7. เปรียบเทียบผลเฉลยระหว่างกรณีที่ไม่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอนและกรณีที่เกิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอนโดยทั้งสองกรณีคิดผลของแสงเชิงความร้อน

จากผลเฉลยในวิธีการข้อที่ 2.2 ซึ่งเป็นการอธิบายการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าในเรโซเนเตอร์กรณีที่ไม่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอน และผลเฉลยในวิธีการข้อที่ 3.2 ซึ่งเป็นการอธิบายการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าในเรโซเนเตอร์กรณีที่เกิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอน แต่ทั้งสองกรณีนั้นยังไม่ได้คิดผลของแสงเชิงความร้อน ทั้งสองกรณีสามารถคิดผลของแสงเชิงความร้อนได้ โดยคงรูปของสมการ (8b) ไว้ดังเดิม จากผลเฉลยของทั้งสองกรณีสามารถเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มแสงอินพุตและความเข้มแสงเอาต์พุตที่ช่องธรรุ และ ครอป ของเรโซเนเตอร์

สถานที่และระยะเวลาทำการวิจัย

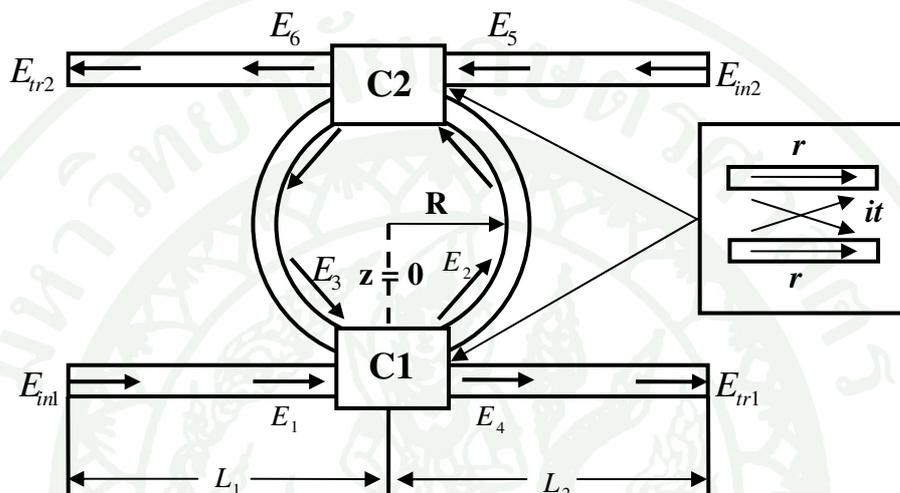
ตีพิมพ์ปฏิบัติการวิทยาศาสตร์พื้นฐาน SCL ห้อง 412 ระยะเวลาในการทำการวิจัย เดือน มิถุนายน-ตุลาคม พ.ศ.2554

แหล่งทุนสนับสนุน

ได้รับทุนวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา เพื่อตีพิมพ์ผลงานในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ ที่ปรากฏในฐานข้อมูล ISI หรือวารสารที่ถูกจัดอยู่ในควอไทล์ที่ 1 หรือ 2 จากบัณฑิตวิทยาลัย

ผลและวิจารณ์

1. เขียนแผนภาพโครงสร้างของเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนที่มีการเชื่อมต่อสองครั้ง



ภาพที่ 11 แผนภาพแสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าในเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนที่มีการเชื่อมต่อสองครั้ง

ภาพที่ 11 แสดงแผนภาพของเรโซเนเตอร์แบบวงแหวนที่มีการเชื่อมต่อสองครั้งและแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าภายในเรโซเนเตอร์ โดยเมื่อเราให้สนามไฟฟ้าอินพุตที่ปลายที่ 1 (E_{in1}) เมื่อสนามไฟฟ้าเข้าสู่ภายในท่อนำคลื่นคือ E_1 สนามไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปตามท่อนำคลื่นเส้นตรงจนกระทั่งถึงจุดเชื่อมต่อที่ 1 (C1) สนามไฟฟ้าบางส่วนเคลื่อนที่ไปสู่ท่อนำคลื่นรูปวงแหวนคือ E_2 และสนามไฟฟ้าส่วนที่เหลือเคลื่อนที่ไปตามท่อนำคลื่นเส้นตรงคือ E_4 เมื่อสนามไฟฟ้า E_2 เคลื่อนที่ภายในท่อนำคลื่นรูปวงแหวนจนกระทั่งถึงจุดเชื่อมต่อที่ 2 (C2) สนามไฟฟ้าบางส่วนเคลื่อนที่ไปสู่ท่อนำคลื่นเส้นตรงคือ E_6 และเอาท์พุทที่ช่องดรอป (Drop) (E_{tr2}) สนามไฟฟ้าส่วนที่เหลือเคลื่อนที่ไปตามท่อนำคลื่นวงแหวนคือ E_3 จนกระทั่งกลับมาที่จุดเชื่อมต่อที่ 1 อีกครั้ง สนามไฟฟ้า บางส่วนเคลื่อนที่ไปสู่ท่อนำคลื่นเส้นตรงรวมกับสนามไฟฟ้า

E_4 และเอาท์พุทที่ช่องธรู (E_{r1}) สนามไฟฟ้าส่วนที่เหลือเคลื่อนที่ไปตามท่อนำคลื่นวงแหวนรวมกับสนามไฟฟ้า (E_2) ในส่วนของช่องอินพุทสนามไฟฟ้าที่ 2 (E_{in2}) ไม่มีการอินพุทสนามไฟฟ้า

2. ศึกษาลักษณะของทวิเสถียรเชิงแสงในกรณีไม่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอนและไม่คิดผลของแสงเชิงความร้อน

สมมุติให้แสงที่เคลื่อนที่ในท่อนำคลื่นรูปวงแหวนและเส้นตรงมารวมกันที่จุด $z = 0$ จะได้ความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าดังนี้

ที่จุดเชื่อมต่ที่ 1 (C1)

$$E_4 = rE_1 + itE_3 \quad (23)$$

$$E_2 = itE_1 + rE_3 \quad (24)$$

$$E_3 = rE(2\pi R) \quad (25)$$

ที่จุดเชื่อมต่ที่ 2 (C2)

$$E_6 = itE(\pi R) \quad (26)$$

$$E_5 = 0 \quad (27)$$

เมื่อแทนสมการที่ (25) ลงไปในสมการที่ (23) และ (24) จากนั้นทำการจัดรูปสมการ โดยกำหนด $I_4 = |E_4|^2 / \omega^2$ และ $I_0 = |E_2|^2 / \omega^2$ จะได้ว่า

$$I_4 = [r^2[I_0 + I(2\pi R)] - 2\sqrt{I_0 I(2\pi R)} \cos \Delta\phi] / (1 - r^2) \quad (28)$$

เมื่อ $\Delta\phi = 2\pi\beta_0 R + \phi(2\pi R) - \phi_0$ คือเฟสที่เลื่อนไปเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ

จากสมการที่ (26)

$$I_6 = t^2 I(\pi R) = (1 - r^2) I(\pi R) \quad (29)$$

จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน

$$I_1 = I_0 + I_4 - [r^2 I(2\pi R)] \quad (30)$$

สมการที่ (28), (29) และ (30) คือความเข้มแสงอินพุตและเอาต์พุตที่จุดเชื่อมระหว่างส่วนที่เป็นรูปวงแหวนและส่วนที่เป็นเส้นตรงของแต่ละด้านของเรโซเนเตอร์ ถ้า L_1 และ L_2 คือความยาวของเรโซเนเตอร์ในส่วนที่เป็นเส้นตรงจากตำแหน่งก่อนและหลังจุดเชื่อมต่อดังภาพที่ 1 ความเข้มแสงที่อินพุตและเอาต์พุตที่จุดปลายของแต่ละด้านของเรโซเนเตอร์สามารถหาได้โดยนำสมการที่ (28), (29) และ (30) แทนลงในสมการที่ (9a) จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$I_m(I_0) = \frac{I_1(I_0) \exp(\alpha L_1)}{\sqrt{1 + I_1^2(I_0) (\xi_r / \alpha) [1 - \exp(2\alpha L_1)]}} \quad (31)$$

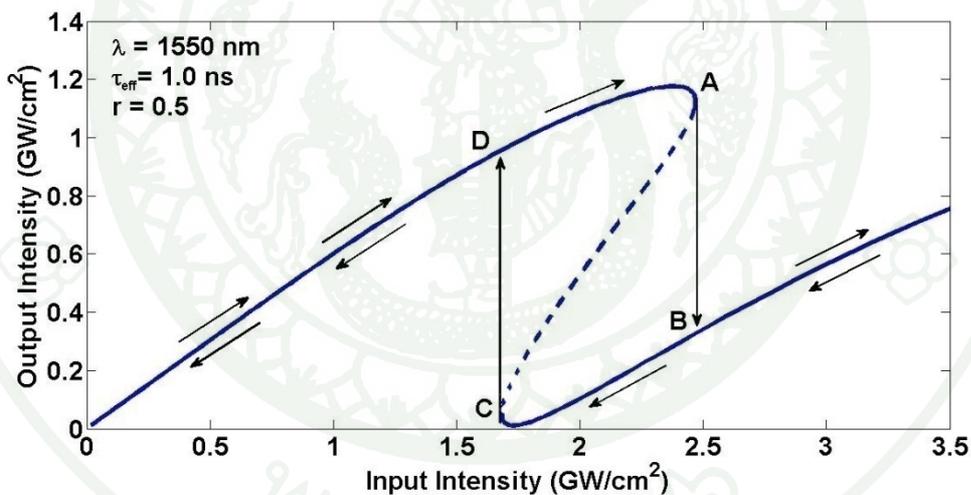
$$I_{tr1}(I_0) = \frac{I_4(I_0) \exp(-\alpha L_2)}{\sqrt{1 + I_4^2(I_0) (\xi_r / \alpha) [1 - \exp(-2\alpha L_2)]}} \quad (32)$$

$$I_{tr2}(I_0) = \frac{I_6(I_0) \exp(-\alpha L_2)}{\sqrt{1 + I_6^2(I_0) (\xi_r / \alpha) [1 - \exp(-2\alpha L_2)]}} \quad (33)$$

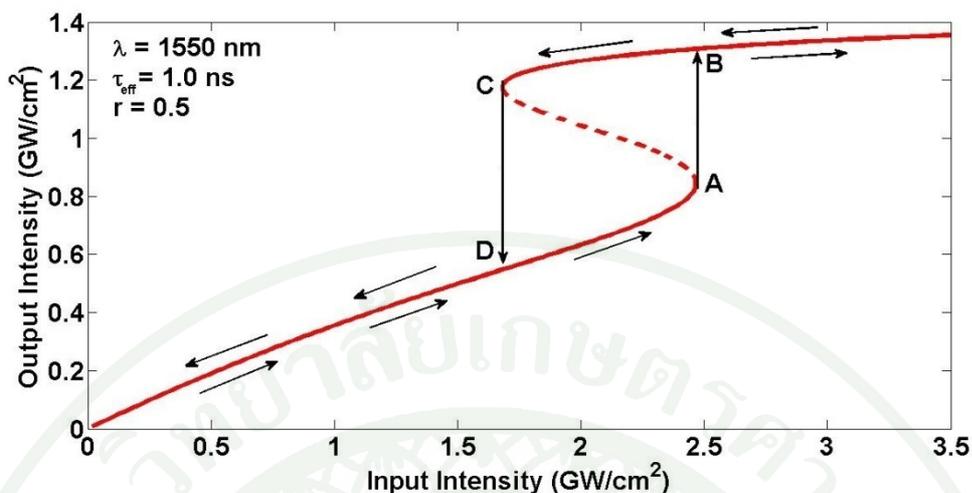
สมการที่ (31), (32) และ (33) คือสมการที่ใช้อธิบายความเข้มแสงอินพุตและเอาต์พุตที่จุดปลายของแต่ละด้านของเรโซเนเตอร์ในกรณีไม่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอน โดย I_m คือความเข้มแสง

อินพุตที่ปลายที่ 1 (E_{in1}) I_{tr1} คือความเข้มแสงเอาต์พุตที่ช่องธรู (E_{tr1}) และ I_{tr2} คือความเข้มแสงเอาต์พุตที่ช่องครอบ (E_{tr2})

จากสมการที่ (31), (32) และ (33) คือสมการที่ใช้อธิบายความเข้มแสงอินพุตและความเข้มแสงเอาต์พุตที่ช่องธรู และ ครอบ ของเรโซเนเตอร์ เมื่อนำมาวาดกราฟเพื่อศึกษาลักษณะของทวิเสถียรเชิงแสง โดยแกน x คือความเข้มแสงอินพุตและ แกน y คือความเข้มแสงเอาต์พุตในการวาดกราฟเราได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ เรโซเนเตอร์รูปร่างแหวนรัศมี 5 ไมโครเมตร และความยาวของส่วนเส้นตรง L_1 และ L_2 เท่ากันเท่ากับ 10 ไมโครเมตร ดัชนีหักเหเชิงเส้นเท่ากับ 3.484 การสูญเสียเชิงเส้นเท่ากับ 1 dB/cm การดูดกลืนสองโฟตอนเท่ากับ 0.5 cm/GW และพารามิเตอร์ไม่เชิงเส้นเคอร์เท่ากับ $6 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 / \text{GW}$ จะได้กราฟดังภาพที่ 12



(ก)



(ข)

ภาพที่ 12 แสดงลักษณะของทวิเสถียรเชิงแสงในกรณีที่ไม่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอนและแสงเชิงความร้อนที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร เวลาชั่วชีวิตยังผลของพาหะอิสระ 1 นาโนวินาที และค่าคงตัวการส่งผ่าน 0.5 (ก) ช่องธรู และ (ข) ช่องครอบ

ภาพที่ 12ก เป็นกราฟของสมการที่ (31) และ (32) ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ของความเข้มแสงอินพุตและความเข้มแสงเอาต์พุตที่ช่องธรู โดยกราฟมีลักษณะคล้ายฮysterตัวเอสกลับด้าน เราสามารถอธิบายลักษณะของทวิเสถียรเชิงแสงจากกราฟได้ดังนี้ เมื่ออินพุตความเข้มแสงเข้าไปในเรโซเนเตอร์ที่ปลายอินพุตที่ 1 และเพิ่มความเข้มแสง ความเข้มแสงเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นในช่วงตั้งแต่ 0 GW/cm^2 ถึง 1.5 GW/cm^2 และแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลในช่วงตั้งแต่ 1.5 GW/cm^2 จนกระทั่งถึงจุด A ประมาณ 2.5 GW/cm^2 ความเข้มแสงเอาต์พุตจะลดลงอย่างรวดเร็วมาที่จุด B ความเข้มแสงเอาต์พุตประมาณ 0.3 GW/cm^2 และเมื่อเพิ่มความเข้มแสงอินพุตจาก 2.5 GW/cm^2 ถึง 3.5 GW/cm^2 ความเข้มแสงเอาต์พุตก็จะเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อเราทำการลดความเข้มแสงอินพุตลง ความเข้มแสงเอาต์พุตก็จะลดลงจาก 0.7 GW/cm^2 จนกระทั่งถึงจุด C จะมีความเข้มแสงเอาต์พุตประมาณ 0 GW/cm^2 ความเข้มแสงเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วไปยังจุด D จะมีความเข้มแสงเอาต์พุตประมาณ 0.95 GW/cm^2 และความเข้มแสงอินพุตประมาณ 1.7 GW/cm^2 และเมื่อทำการลดความเข้มแสงอินพุตลงจาก 1.7 GW/cm^2 ความเข้มแสงเอาต์พุตก็จะลดลงจนเป็นศูนย์ จาก

ความแตกต่างของความเข้มแสงเอทพุทที่เกิดจากการเพิ่มและลดของความเข้มแสงอินพุททำให้เกิดวงฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop) ที่วนตามเข็มนาฬิกา โดยส่วนของกราฟเส้นประแสดงช่วงของฮิสเทอรีซิส

ภาพที่ 12 ข เป็นกราฟของสมการที่ (31) และ (33) ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ของความเข้มแสงอินพุทและความเข้มแสงเอทพุทที่ช่องครอบ โดยกราฟมีลักษณะคล้ายอักษรตัวเอส เราสามารถอธิบายลักษณะของทวิเสถียรเชิงแสงจากกราฟได้ดังนี้ เมื่ออินพุทความเข้มแสงเข้าไปในเรโซเนเตอร์ที่ปลายอินพุทที่ 1 และเพิ่มความเข้มแสง ความเข้มแสงเอทพุทจะเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นในช่วงตั้งแต่ 0 Gw/cm^2 ถึง 1.5 Gw/cm^2 และแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลในช่วงตั้งแต่ 1.5 Gw/cm^2 จนกระทั่งถึงจุด A ประมาณ 2.5 Gw/cm^2 ความเข้มแสงเอทพุทจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมาที่จุด B ความเข้มแสงเอทพุทประมาณ 1.3 Gw/cm^2 และเมื่อเพิ่มความเข้มแสงอินพุทจาก 2.5 Gw/cm^2 ถึง 3.5 Gw/cm^2 ความเข้มแสงเอทพุทก็จะเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อเราทำการลดความเข้มแสงอินพุทลง ความเข้มแสงเอทพุทก็จะลดลงจาก 1.4 Gw/cm^2 จนกระทั่งถึงจุด C จะมีความเข้มแสงเอทพุทประมาณ 1.2 Gw/cm^2 ความเข้มแสงเอทพุทจะลดลงอย่างรวดเร็วไปยังจุด D จะมีความเข้มแสงเอทพุทประมาณ 0.55 Gw/cm^2 และความเข้มแสงอินพุทประมาณ 1.7 Gw/cm^2 และเมื่อทำการลดความเข้มแสงอินพุทลงจาก 1.7 Gw/cm^2 ความเข้มแสงเอทพุทก็จะลดลงจนเป็นศูนย์ จากความแตกต่างของความเข้มแสงเอทพุทที่เกิดจากการเพิ่มและลดของความเข้มแสงอินพุททำให้เกิดวงฮิสเทอรีซิสที่วนทวนเข็มนาฬิกา โดยส่วนของกราฟเส้นประแสดงช่วงของฮิสเทอรีซิส

3. ศึกษาลักษณะของทวิเสถียรเชิงแสงในกรณีคิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอนแต่ไม่คิดผลของแสงเชิงความร่อน

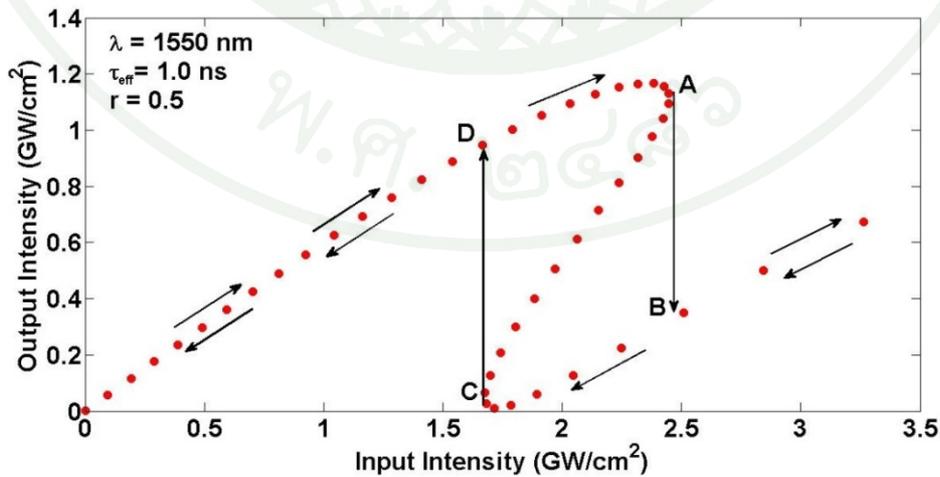
ในกรณีที่พิจารณาผลของปรากฏการณ์ดูดกลืนสองโฟตอน ความเข้มแสงอินพุทและเอทพุทที่จุดปลายของแต่ละด้านของเรโซเนเตอร์สามารถหาได้โดยนำสมการที่ (28), (29) และ (30) แทนลงในสมการที่ (17a) ได้สมการดังนี้

$$-2\alpha z + \beta I_1(I_0)L_{eff}(z) = \ln \left[\frac{(\alpha I_{in}^{-2}(I_0) + \beta I_{in}^{-1}(I_0) + \xi_r)}{\alpha I_1^{-2}(I_0) + \beta I_1^{-1}(I_0) + \xi_r} \right] \quad (34)$$

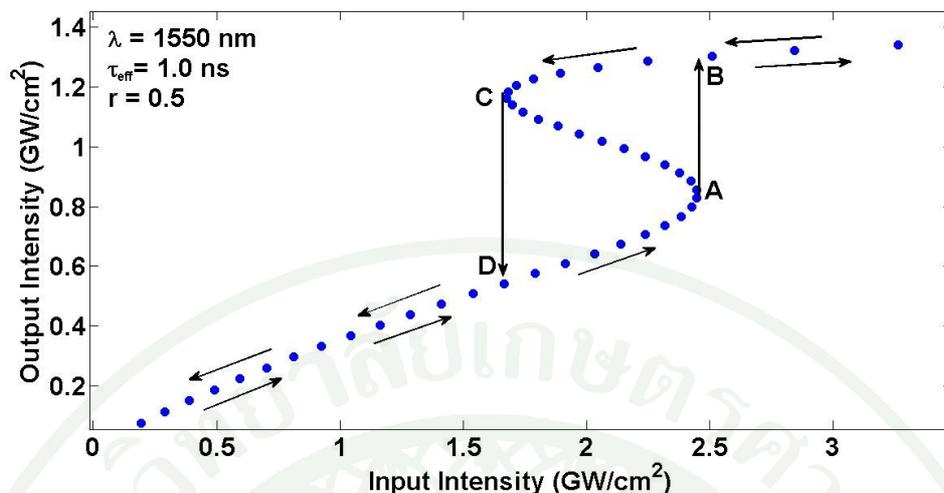
$$2\alpha z + \beta I_4(I_0)L_{eff}(z) = \ln \left[\frac{(\alpha I_{tr1}^{-2}(I_0) + \beta I_{tr1}^{-1}(I_0) + \xi_r)}{\alpha I_4^{-2}(I_0) + \beta I_4^{-1}(I_0) + \xi_r} \right] \quad (35)$$

$$2\alpha z + \beta I_6(I_0)L_{eff}(z) = \ln \left[\frac{(\alpha I_{tr2}^{-2}(I_0) + \beta I_{tr2}^{-1}(I_0) + \xi_r)}{\alpha I_6^{-2}(I_0) + \beta I_6^{-1}(I_0) + \xi_r} \right] \quad (36)$$

สมการที่ (34), (35) และ (36) คือสมการที่ใช้อธิบายความเข้มแสงอินพุตและเอาต์พุตที่จุดปลายของแต่ละด้านของเรโซเนเตอร์ในกรณีที่เกิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอน โดย I_{in} คือความเข้มแสงอินพุตที่ปลายที่ 1 (E_{in1}) I_{tr1} คือความเข้มแสงเอาต์พุตที่ช่องธรู (E_{tr1}) และ I_{tr2} คือความเข้มแสงเอาต์พุตที่ช่องครอบ (E_{tr2}) สมการที่ (34), (35) และ (36) ใช้อธิบายความเข้มแสงอินพุตและความเข้มแสงเอาต์พุตที่ช่องธรู และ ช่องครอบ ของเรโซเนเตอร์ เราได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ เรโซเนเตอร์รูปร่างแหวนรัศมี 5 ไมโครเมตร และเส้นตรง L_1 และ L_2 ยาว 10 ไมโครเมตร ดัชนีหักเหเชิงเส้นเท่ากับ 3.484 การสูญเสียเชิงเส้นเท่ากับ 1 dB/cm การดูดกลืนสองโฟตอนเท่ากับ 0.5 cm/GW และพารามิเตอร์ไม่เชิงเส้นเคอร์เท่ากับ $6 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 / \text{GW}$ และใช้ทฤษฎีแบ่งครึ่งในการหาผลเฉลยจะได้กราฟดังภาพที่ 13



(ก)



(จ)

ภาพที่ 13 ลักษณะของทวิเสถียรเชิงแสงในกรณีคิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอนแต่ไม่คิดผลของแสงเชิงความร้อนสำหรับความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร เวลาชั่วชีวิตยังผลของพาหะอิสระเท่ากับ 1 นาโนวินาที และค่าคงตัวการส่งผ่าน 0.5 (ก) ช่องธรู และ (จ) ช่องครอบ

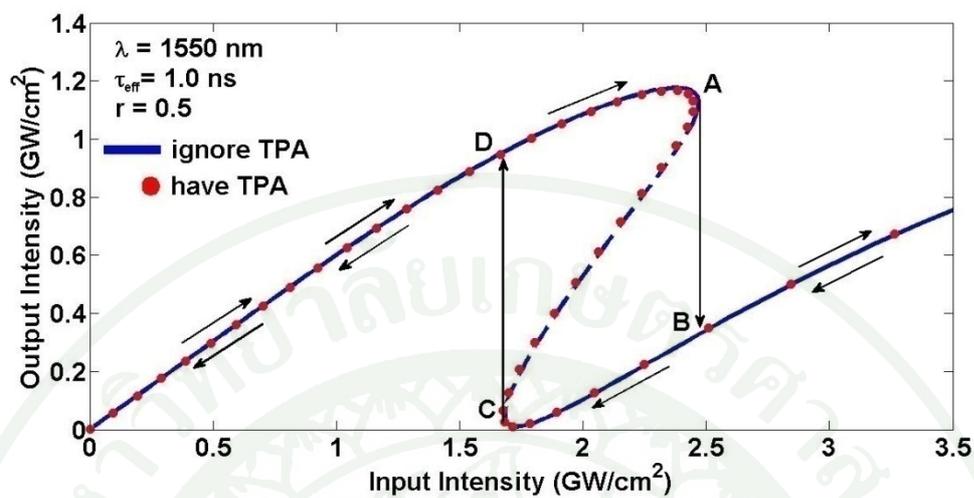
ภาพที่ 13ก เป็นกราฟของสมการที่ (34) และ (35) ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ของความเข้มแสงอินพุตและความเข้มแสงเอาต์พุตที่ช่องธรู โดยกราฟมีลักษณะคล้ายฮิสต์แกรมกลับด้าน เราสามารถอธิบายลักษณะของทวิเสถียรเชิงแสงจากกราฟได้ดังนี้ เมื่ออินพุตความเข้มแสงเข้าไปในเรโซเนเตอร์ที่ปลายอินพุตที่ 1 และเพิ่มความเข้มแสง ความเข้มแสงเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นในช่วงตั้งแต่ 0 Gw/cm^2 ถึง 1.5 Gw/cm^2 และแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลในช่วงตั้งแต่ 1.5 Gw/cm^2 จนกระทั่งถึงจุด A ประมาณ 2.5 Gw/cm^2 ความเข้มแสงเอาต์พุตจะลดลงอย่างรวดเร็วมาที่จุด B ความเข้มแสงเอาต์พุตประมาณ 0.3 Gw/cm^2 และเมื่อเพิ่มความเข้มแสงอินพุตจาก 2.5 Gw/cm^2 ถึง 3.5 Gw/cm^2 ความเข้มแสงเอาต์พุตก็จะเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อเราทำการลดความเข้มแสงอินพุตลง ความเข้มแสงเอาต์พุตก็จะลดลงจาก 0.7 Gw/cm^2 จนกระทั่งถึงจุด C จะมีความเข้มแสงเอาต์พุตประมาณ 0 Gw/cm^2 ความเข้มแสงเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วไปยังจุด D จะมีความเข้มแสงเอาต์พุตประมาณ 0.95 Gw/cm^2 และความเข้มแสงอินพุตประมาณ 1.7 Gw/cm^2 และเมื่อทำการ

ลดความเข้มแสงอินพุตลงจาก 1.7 Gw/cm^2 ความเข้มแสงเอาต์พุตก็จะลดลงจนเป็นศูนย์ จากความแตกต่างของความเข้มแสงเอาต์พุตที่เกิดจากการเพิ่มและลดของความเข้มแสงอินพุตทำให้เกิดวงฮิสเทอรีซิสที่วนตามเข็มนาฬิกา โดยส่วนของกราฟเส้นประแสดงช่วงของฮิสเทอรีซิส

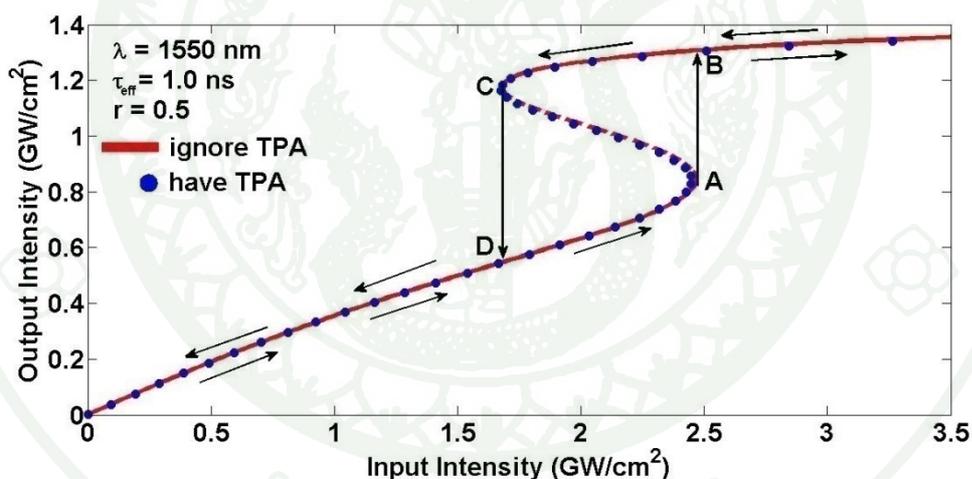
ภาพที่ 13ข เป็นกราฟของสมการที่ (34) และ (36) ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ของความเข้มแสงอินพุตและความเข้มแสงเอาต์พุตที่ช่องครอบ โดยกราฟมีลักษณะคล้ายอักษรตัวเอส เราสามารถอธิบายลักษณะของทวิเสถียรเชิงแสงจากกราฟได้ดังนี้ เมื่ออินพุตความเข้มแสงเข้าไปในเรโซเนเตอร์ที่ปลายอินพุตที่ 1 และเพิ่มความเข้มแสง ความเข้มแสงเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นในช่วงตั้งแต่ 0 Gw/cm^2 ถึง 1.5 Gw/cm^2 และแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลในช่วงตั้งแต่ 1.5 Gw/cm^2 จนกระทั่งถึงจุด A ประมาณ 2.5 Gw/cm^2 ความเข้มแสงเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมาที่จุด B ความเข้มแสงเอาต์พุตประมาณ 1.3 Gw/cm^2 และเมื่อเพิ่มความเข้มแสงอินพุตจาก 2.5 Gw/cm^2 ถึง 3.5 Gw/cm^2 ความเข้มแสงเอาต์พุตก็จะเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อเราทำการลดความเข้มแสงอินพุตลง ความเข้มแสงเอาต์พุตก็จะลดลงจาก 1.4 Gw/cm^2 จนกระทั่งถึงจุด C จะมีความเข้มแสงเอาต์พุตประมาณ 1.2 Gw/cm^2 ความเข้มแสงเอาต์พุตจะลดลงอย่างรวดเร็วไปยังจุด D จะมีความเข้มแสงเอาต์พุตประมาณ 0.55 Gw/cm^2 และความเข้มแสงอินพุตประมาณ 1.7 Gw/cm^2 และเมื่อทำการลดความเข้มแสงอินพุตลงจาก 1.7 Gw/cm^2 ความเข้มแสงเอาต์พุตก็จะลดลงจนเป็นศูนย์ จากความแตกต่างของความเข้มแสงเอาต์พุตที่เกิดจากการเพิ่มและลดของความเข้มแสงอินพุตทำให้เกิดวงฮิสเทอรีซิสที่วนตามเข็มนาฬิกา โดยส่วนของกราฟเส้นประแสดงช่วงของฮิสเทอรีซิส

4.เปรียบเทียบกราฟระหว่างกรณีไม่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอนและกรณีที่ไม่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอนโดยทั้งสองกรณีไม่คิดผลของแสงเชิงความร้อน

จากกราฟของผลการวิเคราะห์ในข้อ 1 และ 2 เราได้เปรียบเทียบกราฟทั้งสองชุดดังภาพที่ 14ก และ 14ข จากกราฟทั้งสองแสดงให้เห็นว่ากราฟที่ได้จากสมการที่ (34), (35) และ (36) คือสมการในกรณีที่ไม่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอนสอดคล้องกับกราฟที่ได้จากสมการที่ (31), (32) และ (33) คือกรณีที่ไม่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอน



(ก)



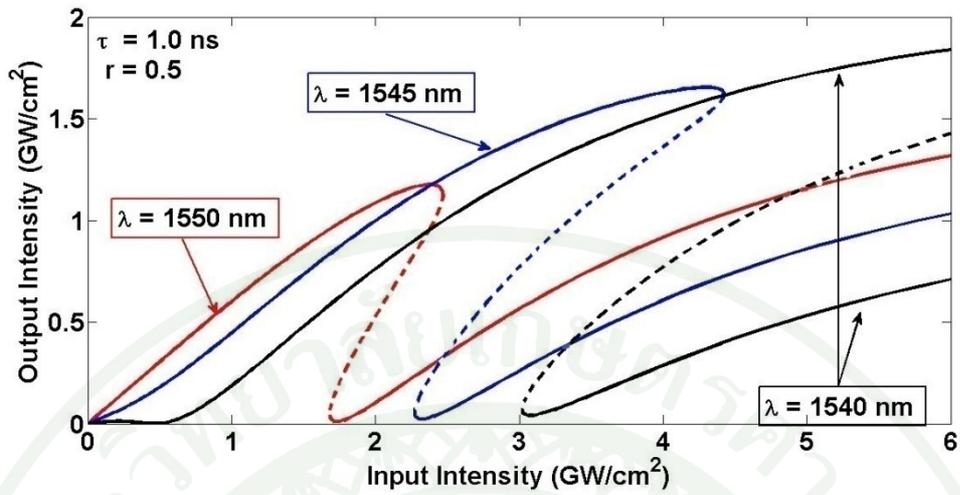
(ข)

ภาพที่ 14 เปรียบเทียบลักษณะของทวีเลดเดอร์เชิงแสงในกรณีคิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอน (วงกลม) และไม่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอน (เส้นทึบ) แต่ทั้งสองกรณีไม่คิดผลของแสงเชิงความร้อนสำหรับความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร เวลาชั่วชีวิตยังผลของพาหะอิสระ 1 นาโนวินาที และค่าคงตัวการส่งผ่าน 0.5 (ก) ช่องซรู และ (ข) ช่องครอบ

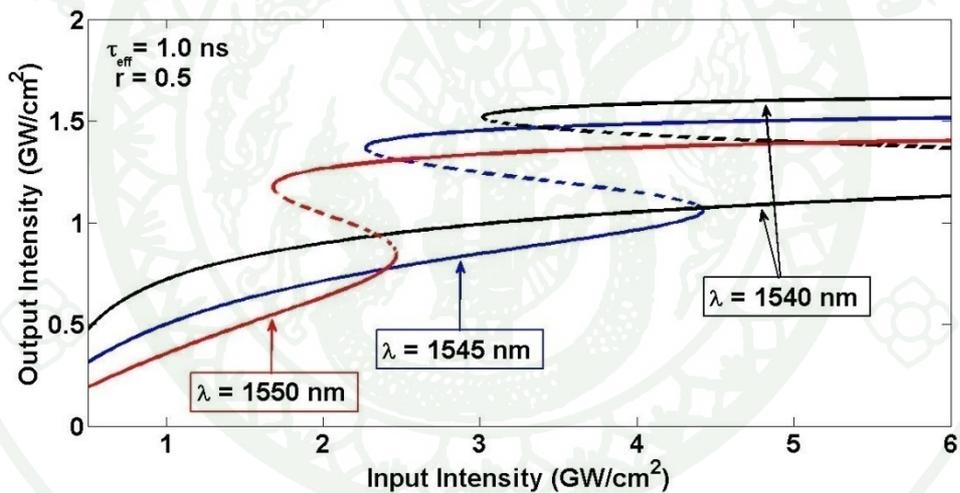
จากกราฟที่ 14 ได้แสดงให้เห็นถึงผลที่สอดคล้องกันระหว่างกรณีที่ไม่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอน (เส้นทึบ) และกรณีที่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอน (จุดวงกลม) ซึ่งแสดงให้เห็นอีกว่าอิทธิพลของการดูดกลืนสองโฟตอนที่ต่อทวิเสถียรเชิงแสงมีผลน้อยมากเมื่อเทียบกับอิทธิพลจากผลของปรากฏการณ์ไม่เชิงเส้นอื่นๆ

5. ศึกษาอิทธิพลของความยาวคลื่นที่มีผลต่อทวิเสถียรเชิงแสงในเรโซเนเตอร์รูปวงแหวนชนิดซิลิกอนบนฉนวน

จากการวาดกราฟจากสมการที่ (31), (32) และ (33) คือสมการที่ใช้อธิบายความเข้มแสงอินพุตและความเข้มแสงเอาต์พุตที่ช่องธรู และ ครอป ของเรโซเนเตอร์ เมื่อนำมาวาดกราฟเพื่อศึกษาลักษณะของทวิเสถียรเชิงแสง โดยแกน x คือความเข้มแสงอินพุตและ แกน y คือความเข้มแสงเอาต์พุตในการวาดกราฟเราได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ รัศมีของเรโซเนเตอร์ในส่วนรูปวงแหวนมีรัศมี 5 ไมโครเมตร และความยาวของส่วนเส้นตรง L_1 และ L_2 มีขนาด 10 ไมโครเมตร ดัชนีหักเหเชิงเส้นเท่ากับ 3.484 การสูญเสียเชิงเส้นเท่ากับ 1 dB/cm การดูดกลืนสองโฟตอนเท่ากับ 0.5 cm/GW และพารามิเตอร์ไม่เชิงเส้นเคอร์เท่ากับ $6 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 / \text{GW}$ และเราได้ทำการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นอินพุตเป็น 1550, 1545 และ 1540 นาโนเมตร เพื่อศึกษาอิทธิพลของความยาวคลื่นที่มีผลต่อทวิเสถียรเชิงแสง ได้กราฟดังภาพที่ 15



(ก)



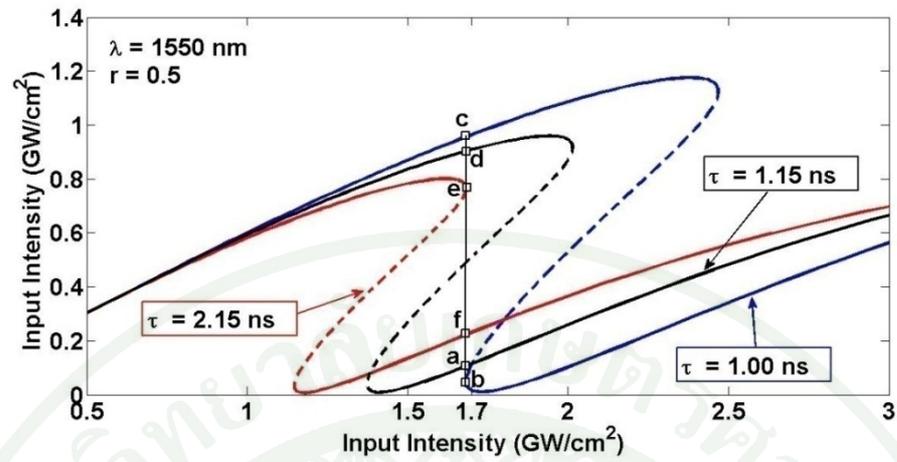
(ข)

ภาพที่ 15 แสดงลักษณะของทวีเสถียรเชิงแสงในกรณีที่ไม่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอนและแสงเชิงความร้อนที่ความยาวคลื่น 1550, 1545 และ 1540 นาโนเมตร เวลาชั่วชีวิตยังผลของพาหะอิสระ 1 นาโนวินาที และค่าคงตัวการส่งผ่าน 0.5 โดย (ก) ช่องธรู และ (ข) ช่องครอบ

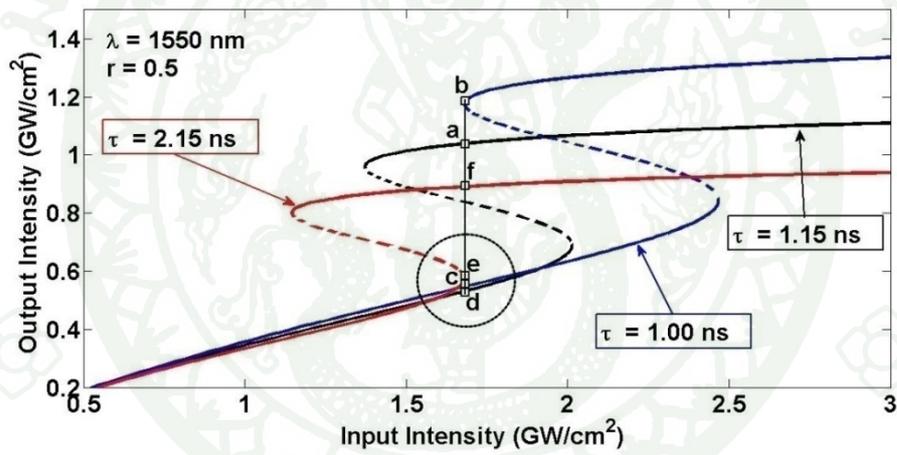
จากภาพที่ 15 แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่ไม่คิดผลของปรากฏการณ์แสงเชิงความร้อน การเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นมีผลทำให้ทวิเสถียรเชิงแสงมีการเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างมาก โดยเมื่อลดความยาวคลื่นอินพุท จะทำให้วงฮิสเทอรีซิสของทวิเสถียรเชิงแสงมีขนาดกว้างขึ้น สูงขึ้น และต้องใช้ความเข้มแสงอินพุทเพิ่มมากขึ้น และในทางตรงข้าม เมื่อเพิ่มความยาวคลื่นจะมีผลทำให้วงฮิสเทอรีซิสของทวิเสถียรเชิงแสงมีขนาดแคบลง ความสูงลดลง และใช้ความเข้มแสงอินพุทน้อยลง เพราะการลดความยาวคลื่นลงทำให้แสงที่อินพุทมีพลังงานมากขึ้น ผลจากแสงที่มีพลังงานมากขึ้นนี้เป็นผลทำให้การสูญเสียต่างๆที่เกิดขึ้นภายในซิลิกอนมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้เกิดการสูญเสียของแสงเพิ่มมากขึ้นและเป็นผลทำให้เกิดทวิเสถียรเชิงแสงที่ความเข้มแสงอินพุทเพิ่มมากขึ้น

6. ศึกษาอิทธิพลของช่วงชีวิตของพาหะอิสระที่มีผลต่อทวิเสถียรเชิงแสงในเรโซเนเตอร์รูปร่างวงแหวนชนิดซิลิกอนบนฉนวน

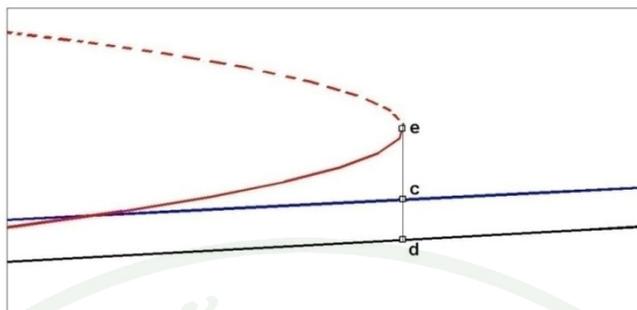
จากการวาดกราฟจากสมการที่ (31), (32) และ (33) คือสมการที่ใช้อธิบายความเข้มแสงอินพุทและความเข้มแสงเอาต์พุทที่ช่องกรู และ ครอป ของเรโซเนเตอร์ เมื่อนำมาวาดกราฟเพื่อศึกษาลักษณะของทวิเสถียรเชิงแสง โดยแกน x คือความเข้มแสงอินพุทและ แกน y คือความเข้มแสงเอาต์พุทในการวาดกราฟเราได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ รัศมีของเรโซเนเตอร์ในส่วนรูปร่างวงแหวนมีรัศมี 5 ไมโครเมตร และความยาวของส่วนเส้นตรง L_1 และ L_2 มีขนาด 10 ไมโครเมตร ดัชนีหักเหเชิงเส้นเท่ากับ 3.484 การสูญเสียเชิงเส้นเท่ากับ 1 dB/cm การดูดกลืนสองโฟตอนเท่ากับ 0.5 cm/GW และพารามิเตอร์ไม่เชิงเส้นเคอร์เท่ากับ $6 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 / \text{GW}$ และเราได้ทำการเปลี่ยนแปลงเวลาช่วงชีวิตของพาหะอิสระไปที่ 1.00, 1.15 และ 2.15 นาโนวินาที เพื่อศึกษาอิทธิพลของช่วงชีวิตของพาหะอิสระที่มีผลต่อทวิเสถียรเชิงแสง ได้กราฟดังภาพที่ 16



(n)



(j)



(ค)

ภาพที่ 16 แสดงลักษณะของทวิเสถียรเชิงแสงในกรณีที่ไม่เกิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอนและแสงเชิงความร้อนที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร ค่าคงตัวการส่งผ่าน 0.5 และเวลาชั่วชีวิตยังผลของพาหะอิสระ 1, 1.5 และ 2.15 นาโนวินาที โดย (ก) ช่องทรู (ข) ช่องครอบ และ (ค) คือภาพขนาดขยายในวงเส้นประของภาพ (ข)

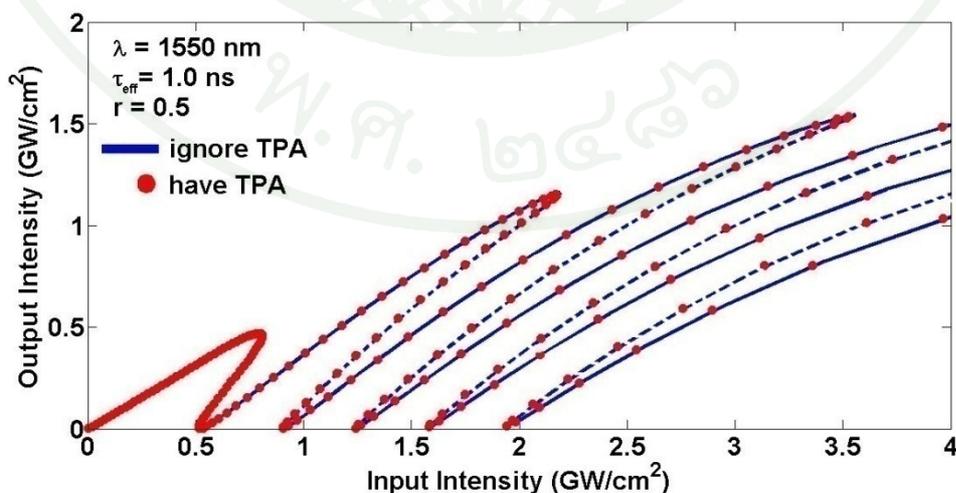
จากกราฟที่ 16 แสดงผลของเวลาชั่วชีวิตของพาหะอิสระที่มีผลต่อทวิเสถียรเชิงแสง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาชั่วชีวิตของพาหะอิสระเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่อความเข้มแสงเอาท์พุททำให้ความเข้มแสงเอาท์พุทมีความเข้มลดลงและทำให้ความสูงของทวิเสถียรลดลง เพราะเมื่อพาหะอิสระมีเวลาชั่วชีวิตเพิ่มมากขึ้นเป็นผลทำให้พาหะอิสระคงอยู่ในระบบได้นานขึ้นเป็นผลทำให้ระบบเกิดการอิ่มตัว (saturation) ของแสงเร็วขึ้นจึงเป็นสาเหตุทำให้ความเข้มแสงเอาท์พุทมีปริมาณน้อยลง และใช้ความเข้มแสงอินพุทลดลง

จากการปรับเวลาชั่วชีวิตของพาหะอิสระในภาพที่ 16 สามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการทำสวิตช์ได้ โดย ถ้าระบบเริ่มต้นที่จุด a ซึ่งมีความเข้มแสงอินพุทใกล้เคียง 1.7 GW/cm^2 ภาพที่ 10ก เมื่อเปลี่ยนเวลาชั่วชีวิตจาก 1.5 นาโนวินาที ไป 1 นาโนวินาที แล้วกลับมาที่ 1.5 นาโนวินาที จะทำให้ความเข้มแสงเอาท์พุทเกิดการสวิตช์จาก จุด a ลดลงมาถึงจุด b แล้วกระโดดขึ้นมาที่จุด c และลดลงมายังจุด d และในทำนองเดียวกันเมื่อเราเปลี่ยนเวลาชั่วชีวิตจาก 1.5 นาโนวินาที ไป 2.15 นาโนวินาที แล้วกลับมาที่ 1.5 นาโนวินาที ก็จะทำให้ความเข้มแสงเอาท์พุทเกิดการสวิตช์จาก จุด d ลดลงมาถึงจุด e แล้วลดลงอย่างรวดเร็วมาถึงจุด f และลดลงมายังจุด a ในขณะที่ภาพที่ 10ข

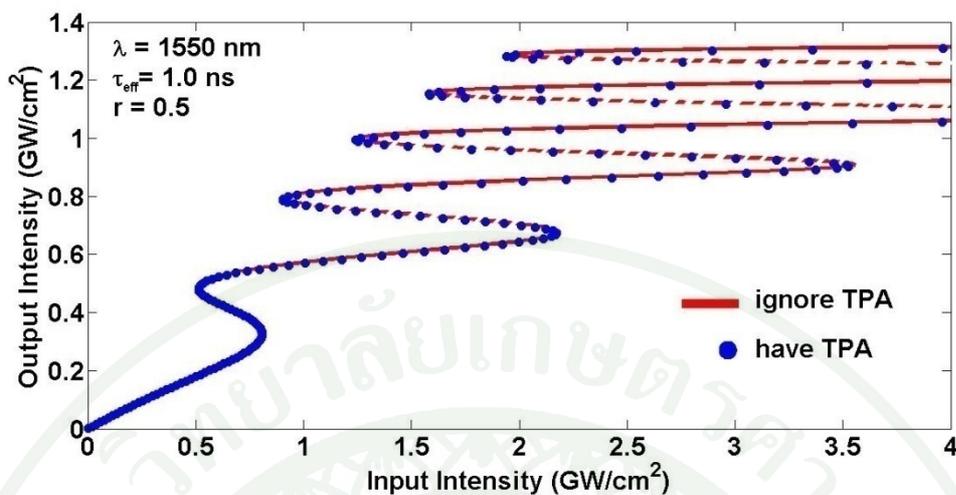
เมื่อเปลี่ยนเวลาช่วงชีวิตจาก 1.5 นาโนวินาที ไป 1 นาโนวินาที แล้วกลับมาที่ 1.5 นาโนวินาที จะทำให้ความเข้มแสงเอาท์พุทเกิดการสวิทช์จาก จุด a เพิ่มขึ้นมาที่จุด b แล้วลดลงอย่างรวดเร็วมาที่จุด c และลดลงมายังจุด d และในทำนองเดียวกันเมื่อเราเปลี่ยนเวลาช่วงชีวิตจาก 1.5 นาโนวินาที ไป 2.15 นาโนวินาที แล้วกลับมาที่ 1.5 นาโนวินาที ก็จะทำให้ความเข้มแสงเอาท์พุทเกิดการสวิทช์จาก จุด d เพิ่มขึ้นมาที่จุด e แล้วกระโดดขึ้นมาที่จุด f และเพิ่มขึ้นมายังจุด a

7. เปรียบเทียบผลเฉลยระหว่างกรณีที่ไม่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอนและกรณีที่เกิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอนโดยทั้งสองกรณีคิดผลของแสงเชิงความร้อน

จากผลเฉลยในสมการที่ (31), (32) และ (33) ในข้อที่ 1 คือผลเฉลยที่ใช้อธิบายการวิวัฒนาการของสนามไปไฟฟ้าในเรโซเนเตอร์กรณีที่ไม่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอน และผลเฉลยในสมการที่ (34), (35) และ (36) ในข้อที่ 2 คือผลเฉลยที่ใช้อธิบายการวิวัฒนาการของสนามไปไฟฟ้าในเรโซเนเตอร์กรณีที่เกิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอนแต่ทั้งสองกรณีนั้น ไม่ได้คิดผลของแสงเชิงความร้อน ทั้งสองกรณีสามารถคิดผลของแสงเชิงความร้อนได้ โดยคงรูปของสมการ (8b) ไว้ดั้งเดิม จากผลเฉลยของทั้งสองกรณีเราได้ทำการวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มแสงอินพุทและความเข้มแสงเอาท์พุทที่ช่องธรู และ ครอป ของเรโซเนเตอร์ ซึ่งได้กราฟภาพที่ 17



(ก)



(ข)

ภาพที่ 17 เปรียบเทียบลักษณะของทวิเสถียรเชิงแสงในกรณีที่เกิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอน (วงกลม) และไม่เกิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอน (เส้นทึบ) โดยทั้งสองกรณีเกิดผลของแสงเชิงความร้อนที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร เวลาชั่วชีวิตยังผลของพาหะอิสระ 1 นาโนวินาที และค่าคงตัวการส่งผ่าน 0.5 โดย (ก) ช่องธรู และ (ข) ช่องครอบ

จากกราฟที่ 17 แสดงผลของแสงเชิงความร้อนที่มีผลต่อทวิเสถียรเชิงแสง โดยแสงเชิงความร้อนเป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการดูดกลืนสองโฟตอนและพาหะอิสระ โดยผลของแสงเชิงความร้อนจะเหนี่ยวนำให้จำนวนของทวิเสถียรเชิงแสงเพิ่มมากขึ้นและลดความเข้มของสนามไฟฟ้าที่จุดที่มีการสวิตช์ของความเข้มแสงที่บริเวณทวิเสถียร และทำให้เกิดทวิเสถียรที่ความเข้มแสงต่ำ

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นลักษณะทวิเสถียรเชิงแสงที่เกิดจากซิลิกอนเรโซเนเตอร์รูปวงแหวนที่มีการเชื่อมต่อสองครั้งในกรณีที่ไม่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอนและแสงเชิงความร้อน โดยความเข้มแสงเอาท์พุทที่ช่องธรู แสดงลักษณะของกราฟทวิเสถียรเชิงแสงที่มีลักษณะเหมือนตัวอักษรเอสกลับด้านและให้วงฮิตเทอริซิสที่มีลักษณะวนตามเข็มนาฬิกา ในส่วนของความเข้มแสงเอาท์พุทที่ช่องครอป มีลักษณะเหมือนตัวอักษรเอสมีวงฮิตเทอริซิสที่มีลักษณะวนทวนเข็มนาฬิกา

จากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นลักษณะทวิเสถียรเชิงแสงที่เกิดจากซิลิกอนเรโซเนเตอร์รูปวงแหวนที่มีการเชื่อมต่อสองครั้งในกรณีที่เกิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอนแต่ไม่คิดแสงเชิงความร้อน โดยความเข้มแสงเอาท์พุทที่ช่องธรู แสดงลักษณะของกราฟทวิเสถียรเชิงแสงที่มีลักษณะเหมือนตัวอักษรเอสกลับด้านและให้วงฮิตเทอริซิสที่มีลักษณะวนตามเข็มนาฬิกา ในส่วนของความเข้มแสงเอาท์พุทที่ช่องครอป มีลักษณะเหมือนตัวอักษรเอสมีวงฮิตเทอริซิสที่มีลักษณะวนทวนเข็มนาฬิกา

จากการเปรียบเทียบทวิเสถียรแสงระหว่างกรณีที่เกิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอนและไม่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอน โดยทั้งสองกรณีไม่คิดผลของแสงเชิงความร้อน ผลของการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นถึงผลที่สอดคล้องกัน ทำให้สรุปได้ว่าการดูดกลืนสองโฟตอนมีผลต่อทวิเสถียรเชิงแสงน้อยมากเมื่อเทียบกับผลของพาหะอิสระ

จากการศึกษาผลของความยาวคลื่นที่มีต่อทวิเสถียรเชิงแสง แสดงให้เห็นว่าเมื่อความยาวคลื่นมีขนาดลดลงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อทวิเสถียรเชิงแสงคือ มีขนาดกว้างขึ้น มีความสูง

เพิ่มขึ้น วงฮิสเทอรีซิสมีขนาดใหญ่ขึ้น และต้องใช้ความเข้มแสงมากขึ้นในการทำให้เกิดทวิเสถียรเชิงแสง

การศึกษาผลของเวลาชั่วชีวิตของพาหะอิสระที่มีต่อทวิเสถียรเชิง จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเวลาชั่วชีวิตของพาหะอิสระแสดงให้เห็นว่าเมื่อ เวลาชั่วชีวิตของพาหะอิสระมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะมีผลทำให้วงฮิสเทอรีซิสมีการหดเล็กลง ใช้ความเข้มแสงลดลงในการทำให้เกิดทวิเสถียรเชิงแสง และมีข้อสังเกตว่า การเปลี่ยนแปลงเวลาชั่วชีวิตของพาหะอิสระสามารถนำมาประยุกต์ในการสร้างสวิตช์เชิงแสงจากทวิเสถียรเชิงได้

การศึกษาผลของแสงเชิงความร้อนที่มีต่อทวิเสถียรเชิงแสง โดยผลของแสงเชิงความร้อนจะเหนี่ยวนำให้จำนวนของทวิเสถียรเชิงแสงเพิ่มมากขึ้นและลดความเข้มของสนามไฟฟ้าที่จุดที่มีการสวิตช์ของความเข้มแสงที่บริเวณทวิเสถียร และทำให้เกิดทวิเสถียรที่ความเข้มแสงต่ำ

ข้อเสนอแนะ

1. เราสามารถศึกษาทวิเสถียรเชิงแสงในเรโซเนเตอร์รูปร่างวงแหวนซิลิกอนสองวงได้โดยการเพิ่มรูปร่างวงแหวนบนวงแหวนจากภาพที่ และย้ายตำแหน่งของ I_0 ไปไว้ที่ด้านล่างของวงที่ใหม่ จากนั้นทำการหาความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ภายในเรโซเนเตอร์เพื่อหากราฟแสดงสถานะทวิเสถียรเชิงแสงได้

2. สามารถนำสมการอธิบายความเข้มแสงภายในเรโซเนเตอร์ที่ได้ไปศึกษาลักษณะของสเปกตรัมส่งผ่านด้วยการหาอัตราส่วนระหว่างความเข้มแสงเอาต์พุตต่อความเข้มแสงอินพุต

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ปราโมทย์ เดชะอำไพ. 1995. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ในงานวิศวกรรม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ

Agrawal, G. P. 2007. **Nonlinear effects in silicon waveguides.** (pdf). institute of optics. university of Rochester. Rochester. New york.

Almeida, V. R. and M. Lipson. 2004. Optical bistability on silicon chip. **Opt. Lett.** 29:2387-2389.

Encyclopedia for Photonics and Laser Technology. 2011. **Two-photon Absorption.** Available Source: http://www.rp-photonics.com/two_photon_absorption.html, January 29, 2012.

Kusalajeerung, C., S. Chiangga., S. Pitukwongsaporn. and P. P. Yupapin. 2011. Nonlinear switching in a silicon based ring resonators. **Opt. Engineering.** 50(2):024601.

Lin, Q., Oskar J. Painter, and G. P. Agrawal. 2007. Nonlinear optical phenomena in silicon waveguides: Modeling and applications. **Opt. Express.** 15:16604–16644.

Mathews, J. H. and K. D. Fink. 2004. **Numerical Methods Using Matlab.** Fourth ed. Prentice Hall. Upper Saddle River. New Jersey. USA.

Priem, G., P. Dumon, W. Bogaerts, D. Van Thourhout, G. Morthier and R. Baets. 2005. Optical bistability and pulsating behaviour in Silicon-On-Insulator ring resonator structures. **Opt. Express.** 13. 23:9624.

Reed, G. T. and A. P. Knights. 2004. Silicon photonics an introduction. **John Wiley & Sons Ltd.** The Atrium. Southern Gate. Chichester. West Sussex PO19 8SQ, England.

Rukhlenko, I. D., M. Premaratne, and G. P. Agrawal. 2010. Analytical study of optical bistability in silicon ring resonators. **Opt. Lett.** 35:55–57.

Rukhlenko, I. D., M. Premaratne, and G. P. Agrawal. 2010. Nonlinear Silicon Photonics: Analytical Tools. **IEEE**. 16:200–215.

Rukhlenko, I. D., M. Premaratne, and G. P. Agrawal. 2009. Analytical study of optical bistability in silicon-waveguide resonators. **Opt. Express**. 17:22124–22137.



ภาคผนวก



$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dz} = -\frac{\alpha}{2} - \left(\frac{\beta}{2} - i\gamma\right) |A|^2 - \left(\frac{\xi_r}{2} - i\xi_i\right) |A|^4 \quad (1)$$

เมื่อ $\beta \rightarrow 0$ และ $A(z) = \sqrt{I(z)} \exp[i\phi(z)]$ จากสมการที่ (1) จะได้ว่า

$$\frac{1}{\sqrt{I(z)}} \frac{d\sqrt{I(z)}}{dz} + \frac{1}{\exp[i\phi(z)]} \frac{d \exp[i\phi(z)]}{dz} = -\frac{\alpha}{2} + i\gamma I(z) - \frac{\xi_r}{2} I^2(z) + i\xi_i I^2(z)$$

$$\frac{1}{2I(z)} \frac{dI(z)}{dz} + \frac{id\phi(z)}{dz} = -\frac{\alpha}{2} - \frac{\xi_r}{2} I^2(z) + i\gamma I(z) + i\xi_i I^2(z) \quad (2)$$

จากสมการที่ (2) สามารถแยกได้เป็น

$$\frac{1}{2I(z)} \frac{dI(z)}{dz} = -\frac{\alpha}{2} - \frac{\xi_r}{2} I^2(z) \quad (3)$$

$$i \frac{d\phi(z)}{dz} = i\gamma I(z) + i\xi_i I^2(z) \quad (4)$$

จากสมการที่ (3) จะได้ว่า

$$\frac{dI(z)}{I(z)(-\alpha - \xi_r I^2(z))} = dz$$

$$-\frac{dI(z)}{\alpha I(z)} - \frac{(\xi_r / \alpha) I(z) dI(z)}{(-\alpha - \xi_r I^2(z))} = dz$$

$$-\frac{1}{\alpha} \ln I(z) \Big|_0^z - \int_0^z \frac{(\xi_r / \alpha) I(z) dI(z)}{(-\alpha - \xi_r I^2(z))} = z$$

$$\frac{1}{\alpha} \ln\left(\frac{I_0}{I(z)}\right) + \frac{1}{2\alpha} \ln\left(\frac{(-\alpha - \xi_r I^2(z))}{(-\alpha - \xi_r I_0^2)}\right) = z$$

$$\ln\left(\left(\frac{I_0}{I(z)}\right)\left(\frac{-\alpha - \xi_r I^2(z)}{-\alpha - \xi_r I_0^2}\right)^{1/2}\right) = \alpha z$$

$$\left(\frac{I_0}{I(z)}\right)\left(\frac{-\alpha - \xi_r I^2(z)}{-\alpha - \xi_r I_0^2}\right)^{1/2} = e^{\alpha z}$$

$$\frac{-\alpha - \xi_r I^2(z)}{-\alpha - \xi_r I_0^2} = \left(\frac{I(z)}{I_0}\right)^2 e^{2\alpha z}$$

$$(-\alpha - \xi_r I^2(z)) = (-\alpha - \xi_r I_0^2) \left(\frac{I(z)}{I_0}\right)^2 e^{2\alpha z}$$

$$-\alpha + I^2(z) \left(-\xi_r + \frac{\alpha + \xi_r I_0^2}{I_0^2 e^{-2\alpha z}}\right) = 0$$

$$I^2(z) = \frac{\alpha}{\left(-\xi_r + \frac{\alpha + \xi_r I_0^2}{I_0^2 e^{-2\alpha z}}\right)}$$

$$I^2(z) = \frac{I_0^2 e^{-2\alpha z}}{\left(-(\xi_r / \alpha) I_0^2 e^{-2\alpha z} + 1 + (\xi_r / \alpha) I_0^2\right)}$$

$$I(z) = \frac{I_0 e^{-\alpha z}}{\sqrt{1 + I_0^2 (\xi_r / \alpha) [1 - e^{-2\alpha z}]}} \quad (5)$$

สมการที่ (5) คือผลเฉลยในส่วนจำนวนจริงซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับระยะทางในกรณีที่ระบบไม่คิดผลของการดูดกลืนสองโฟตอน

จากสมการในส่วนจินตภาพสมการที่ (4) สามารถหาผลเฉลยได้ดังนี้

$$i \frac{d\phi(z)}{dz} = i\mathcal{H}(z) + i\xi_i I^2(z) \quad (4)$$

$$d\phi(z) = \mathcal{H}(z)dz + \xi_i I^2(z)dz$$

$$\int_0^z d\phi(z) = \int_0^z \mathcal{H}(z)dz - \int_0^z \xi_i I^2(z)dz$$

จากสมการที่ (5) จะได้ว่า

$$\phi(z) - \phi_0 = \mathcal{H}_0 \int_0^z \frac{e^{-\alpha z} dz}{\sqrt{1 + I_0^2(\xi_r/\alpha)[1 - e^{-2\alpha z}]}} - \xi_i I_0^2 \int_0^z \frac{e^{-2\alpha z} dz}{1 + I_0^2(\xi_r/\alpha)[1 - e^{-2\alpha z}]}$$

แยกพิจารณาที่พจน์

$$\mathcal{H}_0 \int_0^z \frac{e^{-\alpha z} dz}{\sqrt{1 + I_0^2(\xi_r/\alpha)[1 - e^{-2\alpha z}]}} = \mathcal{H}_0 \int_0^z \frac{e^{-\alpha z} dz}{\sqrt{1 + I_0^2(\xi_r/\alpha) - I_0^2(\xi_r/\alpha)e^{-2\alpha z}}}$$

เมื่อ $a = \sqrt{1 + I_0^2(\xi_r/\alpha)}$ และ $u = I_0 \sqrt{\xi_r/\alpha} e^{-\alpha z}$

$$= \frac{-\gamma}{\sqrt{\xi_r/\alpha}} \int_0^z \frac{du}{\sqrt{a^2 - u^2}}$$

$$= -\frac{\gamma}{\sqrt{\xi_r/\alpha}} \sin^{-1} \frac{u}{a} \Big|_0^z$$

เมื่อ $\frac{u}{a}$ มีค่าน้อยมากจะได้ว่า $\sin^{-1} \frac{u}{a} \approx \tan^{-1} \frac{u}{b}$ เมื่อ $b = \sqrt{a^2 - u^2}$ จะได้ว่า

$$= -\frac{\gamma}{\sqrt{\xi_r/\alpha}} \tan^{-1} \frac{u}{b} \Big|_0^z = -\frac{\mathcal{H}_0}{I_0 \sqrt{\xi_r/\alpha}} \left[\tan^{-1} \frac{I_0 \sqrt{\xi_r/\alpha} e^{-\alpha z}}{\sqrt{1 + I_0^2(\xi_r/\alpha)[1 - e^{-2\alpha z}]}} - \tan^{-1} I_0 \sqrt{\xi_r/\alpha} \right]$$

$$\mathcal{H}_0 \int_0^z \frac{e^{-\alpha z} dz}{\sqrt{1 + I_0^2(\xi_r/\alpha)[1 - e^{-2\alpha z}]}} = \frac{\mathcal{H}_0}{I_0 \sqrt{\xi_r/\alpha}} \left[\tan^{-1} I_0 \sqrt{\xi_r/\alpha} - \tan^{-1} I(z) \sqrt{\xi_r/\alpha} \right]$$

$$\mathcal{M}_0 \int_0^z \frac{e^{-\alpha z} dz}{\sqrt{1 + I_0^2(\xi_r/\alpha)[1 - e^{-2\alpha z}]}} = \mathcal{M}_0 L_{eff}$$

$$\text{เมื่อ } L_{eff} = \frac{\tan^{-1} I_0 \sqrt{\xi_r/\alpha} - \tan^{-1} I(z) \sqrt{\xi_r/\alpha}}{I_0 \sqrt{\xi_r/\alpha}}$$

หาผลเฉลยพจน์ที่สอง

$$\xi_i I_0^2 \int_0^z \frac{e^{-2\alpha z} dz}{1 + I_0^2(\xi_r/\alpha)[1 - e^{-2\alpha z}]} = \xi_i I_0^2 \int_0^z \frac{e^{-2\alpha z} dz}{1 + I_0^2(\xi_r/\alpha) - I_0^2(\xi_r/\alpha)e^{-2\alpha z}}$$

$$\text{ให้ } v = 1 + I_0^2(\xi_r/\alpha) - I_0^2(\xi_r/\alpha)e^{-2\alpha z}$$

$$= \frac{\xi_i}{2\xi_r} \int_0^z \frac{dv}{v} = \frac{\xi_i}{2\xi_r} \ln v \Big|_0^z$$

$$= \frac{\xi_i}{\xi_r} \left[\ln(1 + I_0^2(\xi_r/\alpha)[1 - e^{-2\alpha z}])^{1/2} - \ln I_0 e^{-\alpha z} + \ln I_0 e^{-\alpha z} \right]$$

$$= \frac{\xi_i}{\xi_r} \left[\ln \left[\frac{I_0(1 + I_0^2(\xi_r/\alpha)[1 - e^{-2\alpha z}])^{1/2}}{I_0 e^{-\alpha z}} \right] - \alpha z \right]$$

$$\xi_i I_0^2 \int_0^z \frac{e^{-2\alpha z} dz}{1 + I_0^2(\xi_r/\alpha)[1 - e^{-2\alpha z}]} = \frac{\xi_i}{\xi_r} \left[\ln \left(\frac{I_0}{I(z)} \right) - \alpha z \right]$$

จากผลเฉลยทั้งสองพจน์จะได้ว่า

$$\phi(z) = \phi_0 + \mathcal{M}_0 L_{eff} - \frac{\xi_i}{\xi_r} \left[\ln \left(\frac{I_0}{I(z)} \right) - \alpha z \right] \quad (6)$$

$$\text{เมื่อ } L_{eff} = \frac{\tan^{-1} I_0 \sqrt{\xi_r/\alpha} - \tan^{-1} I(z) \sqrt{\xi_r/\alpha}}{I_0 \sqrt{\xi_r/\alpha}}$$



ภาคผนวก ข
แสดงการหาความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าอินพุทและเอาต์พุท

ที่จุดเชื่อมต่อที่ 1 (C1)

$$E_4 = rE_1 + itE_3 \quad (4)$$

$$E_2 = itE_1 + rE_3 \quad (5)$$

$$E_3 = rE(2\pi R) \quad (6)$$

ที่จุดเชื่อมต่อที่ 2 (C2)

$$E_6 = itE(\pi R) \quad (7)$$

$$E_5 = 0 \quad (8)$$

it(4) - r(2) จะได้ว่า

$$itE_4 - rE_2 = -E_3$$

$$t^2 E_4 E_4^* = r^2 (E_2 - E(2\pi R))(E_2 - E(2\pi R))^*$$

$$t^2 |E_4|^2 = r^2 [E_2 E_2^* - E_2 E^*(2\pi R) - E_2^* E(2\pi R) - E(2\pi R) E^*(2\pi R)]$$

จาก $E = \omega A(z) \exp(i\beta_0 z)$ เมื่อ $A(z) = \sqrt{I(z)} \exp(i\phi(z))$

$$t^2 |E_4|^2 = r^2 [|E_2|^2 + |E(2\pi R)|^2 - \omega^2 \sqrt{I_0 I(2\pi R)} (e^{i(\phi(2\pi R) - \phi_0)} + e^{-i(\phi(2\pi R) - \phi_0)})]$$

เมื่อ $I = |E|^2 / \omega^2$

$$I_4 = r^2[I_0^2 + I(2\pi R) - 2\sqrt{I_0 I(2\pi R)} \cos \Delta\phi]$$

$$I_4 = \frac{r^2[I_0^2 + I(2\pi R) - 2\sqrt{I_0 I(2\pi R)} \cos \Delta\phi]}{1 - r^2}$$

เมื่อ $\Delta\phi = 2\pi R\beta_0 + \phi(2\pi R) - \phi_0$

$$E_4 + E_2 = E_1 + E_3$$

$$(E_4 + E_2)(E_4 + E_2)^* = (E_1 + E_3)(E_1 + E_3)^*$$

$$|E_2|^2 + |E_4|^2 - E_4^*E_2 - E_4E_2^* = |E_1|^2 + |E_3|^2 - E_3^*E_1 - E_1E_3^*$$

$$E_4^*E_2 = (rE_1 + itE_3)^*(rE_3 + itE_1)$$

$$E_4E_2^* = (rE_1 + itE_3)(rE_3 + itE_1)^*$$

$$|E_4|^2 + |E_2|^2 = |E_3|^2 + |E_1|^2$$

$$I_1 = I_4 + I_0 - I(2\pi R)$$



```

% Ringresonator Doublebar Multianalysis
% Ringresonator Doublebar Without TPA
% parameter list
count=0 ;
%for lamda = (1.5e-6)/(1e-2):(0.001e-6)/(1e-2):(1.6e-6)/(1e-2)
%Io = 0.1;
R=(5e-6)/(1e-2); % radius of ring-resonator (cm)
L1=(10e-6)/(1e-2); % input length of straight waveguide (cm)
L2=(10e-6)/(1e-2); % output of straight waveguide (cm)
r=0.5; % reflection into the ring after coupler
no=3.484; %refractive index3.484
alpha=1; %linear loss in dB/cm
beta=0.5; % TPA (cm/GW)
n2=6e-5; % nonlinear Kerr parameter (cm^2/GW)
time=1.0e-9; %free carier lifetime (s)
h=6.6e-43;
c=(3e+8)/(1e-2);
lamda=(1.55e-6)/(1e-2); % wavelength(m)
k=2*pi/lamda;
orpero=lamda/((1.55e-6)/(1e-2));
zigmar=(1.45e-21)/(1e-4); %(cm^2)
zigman=(5.3e-27)/(1e-6); %(cm^3)
sigma=zigmar*(orpero^2); %free-carier (cm^2)
mu = 2*k*zigman/zigmar;
Xir=sigma*time*beta/(2*c*h/lamda); % free-carrier(cm^3/GW)
%Xii = (mu/2)*Xir;
z=2*pi*R; %circumference
gamma=k*n2;
betao=no*k;
phi=2*pi;

```

```

%-----

% Ringresonator Doublebar with TPA
% parameter list
q=1/sqrt(1-(4*alpha*Xir/(beta^2)));

%-----

% Ringresonator Doublebarr with TPA&TOE
% parameter list

cappa=1.86e-4; % is the Thermo-optic coefficient of silicon
dt=1e-6; %the thermal dissipation time (s)
C=705; % is the thermal capacity (J/(kg*K))
lo=2.3e-3; % is the density of silicon (kg/cm^3)
mup=mu+(2*k*beta*cappa*dt/(Xir*C*lo))*(1e+9);
Xii = (mup/2)*Xir;

%-----

for Io =0:0.01:2.25

Iz=Io*exp(-1*alpha*phi*R)/sqrt(1+(Io^2)*(Xir/alpha)*(1-exp(-2*alpha*phi*R)));

leff=(atan(Io*sqrt(Xir/alpha))-atan(Iz*sqrt(Xir/alpha)))/(Io*sqrt(Xir*alpha));

phiz=(gamma*Io*leff)-(Xii/Xir)*(log(Io/Iz)-alpha*(phi)*R);

dphi=((phi*betao*R)+(phiz));

```

```

I4=((Io)+(Iz)-(2*sqrt(Io*Iz)*cos(dphi)))*(r^2)/(1-(r^2));

I1=Io-(Iz*(r^2))+I4;

Iin=I1*exp(alpha*L1)/sqrt(1+(I1^2)*(Xir/alpha)*(1-exp(2*alpha*L1)));

Itr=I4*exp(-1*alpha*L2)/sqrt(1+(I4^2)*(Xir/alpha)*(1-exp(-2*alpha*L2)));

Ipir2=(Io*exp(-1*alpha*pi*R)/sqrt(1+(Io^2)*(Xir/alpha)*(1-exp(-2*alpha*pi*R))));

Ipir=Ipir2*(1-(r^2));

Itr2=Ipir*exp(-1*alpha*L2)/sqrt(1+(Ipir^2)*(Xir/alpha)*(1-exp(-2*alpha*L2)));
%-----
count=count+1;
IinN(count)=Iin;
ItrN(count)=Itr;
Itr2N(count)=Itr2;

end

figure(1);
plot(IinN,ItrN,'b-');
grid on;
hold on;

```



```

R=(5e-6)/(1e-2); % radius of ring-resonator (cm)
L1=(10e-6)/(1e-2); % input length of straight waveguide (cm)
L2=(10e-6)/(1e-2); % output of straight waveguide (cm)
r=0.5; % reflection into the ring after coupler
no=3.484; %refractive index3.484
alpha=1; %linear loss in dB/cm
beta=0.5; % TPA (cm/GW)
n2=6e-5; % nonlinear Kerr parameter (cm^2/GW)
time=1e-9; %free carier lifetime (s)
h=6.6e-43;
c=(3e+8)/(1e-2);
lamda=(1.55e-6)/(1e-2); % wavelength(m)
k=2*pi/lamda;
orpero=lamda/((1.55e-6)/(1e-2));
zigmar=(1.45e-21)/(1e-4); %(cm^2)
zigman=(5.3e-27)/(1e-6); %(cm^3)
sigma=zigmar*(orpero^2); %free-carier (cm^2)
mu = 2*k*zigman/zigmar;
Xir=sigma*time*beta/(2*c*h/lamda); % free-carrier(cm^3/GW)
%Xii = (mu/2)*Xir;
z=2*pi*R; %circumference
gamma=k*n2;
betao=no*k;
%-----

% Ringresonator Doublebar with TPA
% parameter list
q=1/sqrt(1-(4*alpha*Xir/(beta^2)));

cappa=1.86e-4; % is the Thermo-optic coefficient of silicon

```

dt=1e-6; %the thermal dissipation time (s)

C=705; % is the thermal capacity (J/(kg*K))

lo=2.3e-3; % is the density of silicon (kg/cm^3)

mup=mu+(2*k*beta*cappa*dt/(Xir*C*lo))*(1e+9);

Xii = (mup/2)*Xir;

for Io=0.0000000000000000001:0.01:2.5

%function with TPA

%-----

%f =

(2*alpha*2*pi*R)+(beta*Io*((q/(beta*Io))*log(((q*(1+2*(Xir/beta)*x)+1)/(q*(1+2*(Xir/beta)*x)-1))*((q*(1+2*(Xir/beta)*Io)-1)/(q*(1+2*(Xir/beta)*Io)+1))))-log(((alpha*(x^(-2)))+(beta*(x^(-1)))+Xir)/((alpha*(Io^-2)))+(beta*(Io^-1))+Xir));

a=0;

fa =

(2*alpha*2*pi*R)+(beta*Io*((q/(beta*Io))*log(((q*(1+2*(Xir/beta)*a)+1)/(q*(1+2*(Xir/beta)*a)-1))*((q*(1+2*(Xir/beta)*Io)-1)/(q*(1+2*(Xir/beta)*Io)+1))))-log(((alpha*(a^(-2)))+(beta*(a^(-1)))+Xir)/((alpha*(Io^-2)))+(beta*(Io^-1))+Xir));

b=20;

fb =

(2*alpha*2*pi*R)+(beta*Io*((q/(beta*Io))*log(((q*(1+2*(Xir/beta)*b)+1)/(q*(1+2*(Xir/beta)*b)-1))*((q*(1+2*(Xir/beta)*Io)-1)/(q*(1+2*(Xir/beta)*Io)+1))))-log(((alpha*(b^(-2)))+(beta*(b^(-1)))+Xir)/((alpha*(Io^-2)))+(beta*(Io^-1))+Xir));

delta=0.00000001;

ya=fa;

yb=fb;

```

if ya*yb > 0,return,end
max1=1+round((log(b-a)-log(delta))/log(2));
for k=1:max1
    c=(a+b)/2;
    fc =
(2*alpha*2*pi*R)+(beta*Io*((q/(beta*Io))*log(((q*(1+2*(Xir/beta)*c)+1)/(q*(1+2*(Xir/beta)*c)
-1))*((q*(1+2*(Xir/beta)*Io)-1)/(q*(1+2*(Xir/beta)*Io)+1))))-log(((alpha*(c^(-2)))+(beta*(c^(-
1)))+Xir)/((alpha*(Io^-2)))+(beta*(Io^-1))+Xir));
    yc=fc;
    if yc==0
        a=c;
        b=c;
    elseif yb*yc>0
        b=c;
        yb=yc;
    else
        a=c;
        ya=yc;
    end
    if b-a < delta, break,end
end

c=(a+b)/2;
err=abs(b-a);

yc=fc;

Kz=1+2*(Xir/beta)*c;
Ko=1+2*(Xir/beta)*Io;

```

```

leffTPA=(q/(beta*Io))*log(((q*Kz+1)/(q*Kz-1))*((q*Ko-1)/(q*Ko+1)));
phizTPA=(gamma*Io*leffTPA)-(Xii/Xir)*(log(Io/c)-alpha*z-(beta*leffTPA/(2*gamma)));
dphiTPA=(2*pi*betao*R)+phizTPA;
I4TPA=((Io)+(c)-(2*sqrt(Io*c)*cos(dphiTPA)))*(r^2)/(1-(r^2));
I1TPA=Io-(c*(r^2))+I4TPA;

aI=0;
faI = (-
2*alpha*L1)+(beta*I1TPA*((q/(beta*I1TPA))*log(((q*(1+2*(Xir/beta)*aI)+1)/(q*(1+2*(Xir/bet
a)*aI)-1))*((q*(1+2*(Xir/beta)*I1TPA)-1)/(q*(1+2*(Xir/beta)*I1TPA)+1))))-log(((alpha*(aI^(-
2)))+(beta*(aI^(-1)))+Xir)/((alpha*(I1TPA^-2))+beta*(I1TPA^-1))+Xir));
bI=20;
fbI = (-
2*alpha*L1)+(beta*I1TPA*((q/(beta*I1TPA))*log(((q*(1+2*(Xir/beta)*bI)+1)/(q*(1+2*(Xir/bet
a)*bI)-1))*((q*(1+2*(Xir/beta)*I1TPA)-1)/(q*(1+2*(Xir/beta)*I1TPA)+1))))-log(((alpha*(bI^(-
2)))+(beta*(bI^(-1)))+Xir)/((alpha*(I1TPA^-2))+beta*(I1TPA^-1))+Xir));
delta=0.00000001;

yaI=faI;
ybI=fbI;
if yaI*ybI > 0,return,end
max1I=1+round((log(bI-aI)-log(delta))/log(2));
for k=1:max1I
    cI=(aI+bI)/2;
    fcI = (-
2*alpha*L1)+(beta*I1TPA*((q/(beta*I1TPA))*log(((q*(1+2*(Xir/beta)*cI)+1)/(q*(1+2*(Xir/bet
a)*cI)-1))*((q*(1+2*(Xir/beta)*I1TPA)-1)/(q*(1+2*(Xir/beta)*I1TPA)+1))))-log(((alpha*(cI^(-
2)))+(beta*(cI^(-1)))+Xir)/((alpha*(I1TPA^-2))+beta*(I1TPA^-1))+Xir));
    ycI=fcI;
    if ycI==0

```

```

aI=cI;
bI=cI;
elseif ybI*ycI>0
    bI=cI;
    ybI=ycI;
else
    aI=cI;
    yaI=ycI;
end
if bI-aI < delta, break,end
end
cI=(aI+bI)/2;
err=abs(bI-aI);

yc=fcI;

aII=0;
faII =
(2*alpha*L1)+(beta*I4TPA*((q/(beta*I4TPA))*log(((q*(1+2*(Xir/beta)*aII)+1)/(q*(1+2*(Xir/beta)*aII)-1))*((q*(1+2*(Xir/beta)*I4TPA)-1)/(q*(1+2*(Xir/beta)*I4TPA)+1)))))-
log(((alpha*(aII^(-2)))+(beta*(aII^(-1)))+Xir)/((alpha*(I4TPA^(-2)))+(beta*(I4TPA^(-1)))+Xir));
bII=20;
fbII =
(2*alpha*L1)+(beta*I4TPA*((q/(beta*I4TPA))*log(((q*(1+2*(Xir/beta)*bII)+1)/(q*(1+2*(Xir/beta)*bII)-1))*((q*(1+2*(Xir/beta)*I4TPA)-1)/(q*(1+2*(Xir/beta)*I4TPA)+1)))))-
log(((alpha*(bII^(-2)))+(beta*(bII^(-1)))+Xir)/((alpha*(I4TPA^(-2)))+(beta*(I4TPA^(-1)))+Xir));
delta=0.00000001;

yaII=faII;

```

```

ybII=fbII;
if yaII*ybII > 0,return,end
max1II=1+round((log(bII-aII)-log(delta))/log(2));
for k=1:max1II
    cII=(aII+bII)/2;
    fcII =
(2*alpha*L1)+(beta*I4TPA*((q/(beta*I4TPA))*log(((q*(1+2*(Xir/beta)*cII)+1)/(q*(1+2*(Xir/beta)*cII)-1))*((q*(1+2*(Xir/beta)*I4TPA)-1)/(q*(1+2*(Xir/beta)*I4TPA)+1)))))-
log(((alpha*(cII^(-2)))+(beta*(cII^(-1)))+Xir)/((alpha*(I4TPA^(-2)))+(beta*(I4TPA^(-1)))+Xir));
    ycII=fcII;
    if ycII==0
        aII=cII;
        bII=cII;
    elseif ybII*ycII>0
        bII=cII;
        ybII=ycII;
    else
        aII=cII;
        yaII=ycII;
    end
    if bII-aII < delta, break,end
end

cII=(aII+bII)/2;
err=abs(bII-aII);

yc=fcII;

aIII=0;

```

```

faIII =
(2*alpha*pi*R)+(beta*Io*((q/(beta*Io))*log(((q*(1+2*(Xir/beta)*aIII)+1)/(q*(1+2*(Xir/beta)*aI
II)-1))*((q*(1+2*(Xir/beta)*Io)-1)/(q*(1+2*(Xir/beta)*Io)+1))))-log(((alpha*(aIII^(-
2)))+(beta*(aIII^(-1)))+Xir)/((alpha*(Io^-2)+(beta*(Io^-1))+Xir));
bIII=20;
fbIII =
(2*alpha*pi*R)+(beta*Io*((q/(beta*Io))*log(((q*(1+2*(Xir/beta)*bIII)+1)/(q*(1+2*(Xir/beta)*bI
II)-1))*((q*(1+2*(Xir/beta)*Io)-1)/(q*(1+2*(Xir/beta)*Io)+1))))-log(((alpha*(bIII^(-
2)))+(beta*(bIII^(-1)))+Xir)/((alpha*(Io^-2)+(beta*(Io^-1))+Xir));
delta=0.00000001;

yaIII=faIII;
ybIII=fbIII;
if yaIII*ybIII > 0,return,end
max1III=1+round((log(bIII-aIII)-log(delta))/log(2));
for k=1:max1III
    cIII=(aIII+bIII)/2;
    fcIII =
(2*alpha*pi*R)+(beta*Io*((q/(beta*Io))*log(((q*(1+2*(Xir/beta)*cIII)+1)/(q*(1+2*(Xir/beta)*cI
II)-1))*((q*(1+2*(Xir/beta)*Io)-1)/(q*(1+2*(Xir/beta)*Io)+1))))-log(((alpha*(cIII^(-
2)))+(beta*(cIII^(-1)))+Xir)/((alpha*(Io^-2)+(beta*(Io^-1))+Xir));
    ycIII=fcIII;
    if ycIII==0
        aIII=cIII;
        bIII=cIII;
    elseif ybIII*ycIII>0
        bIII=cIII;
        ybIII=ycIII;
    else
        aIII=cIII;

```

```

yaIII=ycIII;
end
if bIII-aIII < delta, break,end
end

cIII=(aIII+bIII)/2;
err=abs(bIII-aIII);

ycIII=fcIII;

Ipir=cIII*(1-(r^2));

aIII=0;
faIII =
(2*alpha*L1)+(beta*Ipir*((q/(beta*Ipir))*log(((q*(1+2*(Xir/beta)*aIII)+1)/(q*(1+2*(Xir/beta)*
aIII)-1))*((q*(1+2*(Xir/beta)*Ipir)-1)/(q*(1+2*(Xir/beta)*Ipir)+1))))-log(((alpha*(aIII^(-
2)))+(beta*(aIII^(-1)))+Xir)/((alpha*(Ipir^-2))+(beta*(Ipir^-1))+Xir));
bIII=20;
fbIII =
(2*alpha*L1)+(beta*Ipir*((q/(beta*Ipir))*log(((q*(1+2*(Xir/beta)*bIII)+1)/(q*(1+2*(Xir/beta)*
bIII)-1))*((q*(1+2*(Xir/beta)*Ipir)-1)/(q*(1+2*(Xir/beta)*Ipir)+1))))-log(((alpha*(bIII^(-
2)))+(beta*(bIII^(-1)))+Xir)/((alpha*(Ipir^-2))+(beta*(Ipir^-1))+Xir));
delta=0.00000001;

yaIII=faIII;
ybIII=fbIII;
if yaIII*ybIII > 0,return,end
max1III=1+round((log(bIII-aIII)-log(delta))/log(2));
for k=1:max1III
cIII=(aIII+bIII)/2;

```

```

fcIII =
(2*alpha*L1)+(beta*Ipir*((q/(beta*Ipir))*log(((q*(1+2*(Xir/beta)*cIII)+1)/(q*(1+2*(Xir/beta)*
cIII)-1))*((q*(1+2*(Xir/beta)*Ipir)-1)/(q*(1+2*(Xir/beta)*Ipir)+1))))-log(((alpha*(cIII^(-
2)))+(beta*(cIII^(-1))+Xir)/((alpha*(Ipir^-2)+(beta*(Ipir^-1))+Xir)));
ycIII=fcIII;
if ycIII==0
    aIII=cIII;
    bIII=cIII;
elseif ybIII*ycIII>0
    bIII=cIII;
    ybIII=ycIII;
else
    aIII=cIII;
    yaIII=ycIII;
end
if bIII-aIII < delta, break,end
end
cIII=(aIII+bIII)/2;
err=abs(bIII-aIII);

ycIII=fcIII;

%plot Zone
figure(1);
plot(cI,cII,'o','color','red','markerFacecolor','r','markersize',8,'linewidth',2);
grid off;
hold on;
%figure(2);
%plot(lamda,dphi2,'o','color','r','markerFacecolor','r','markersize',2,'linewidth',2);

```

```
%grid off;
%hold on;
%figure(1);
%plot(lamda,10*log10(Itr/Tin),'o','color','blue','markerFacecolor','b','markersize',2,'linewidth',2);
%grid off;
%hold on;
%figure(1);
%plot(lamda,10*log10(Itr2/Iin),'o','color','r','markerFacecolor','r','markersize',2,'linewidth',2);
%grid off;
%hold on;
end
(Mathew and Fink, 2004)
```

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นายชาญณรงค์ กุศลจีรัง
วัน เดือน ปี ที่เกิด	10 มิถุนายน 2531
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดนครพนม
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์) เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2553
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ได้รับทุนในโครงการ พสวท.ปีการศึกษา 2550-2554
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์	1. Kusalajeerung C., S. Chiangga., S. Pitukwongsaporn., P. P. Yupapin. 2011. Nonlinear switching in a silicon based ring resonators. Opt. Engineering. 50(2):024601. 2. Vanishkorn B. C. Kusalajeerung., S. Chiangga., S. Pitukwongsaporn., P. P. Yupapin. 2011. Linear and Nonlinear Behaviors of Light in a Silicon Ring Resonator. Mop. Lett. 53:997-1000