

การวิเคราะห์การกำเนิดฮาร์โมนิกอันดับสองแมตซ์เฟสแบบคล้ายในท่อนำคลื่นแสง
โดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพากชัน



นาย ปิยพงศ์ นิพัทธ์ศานต์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

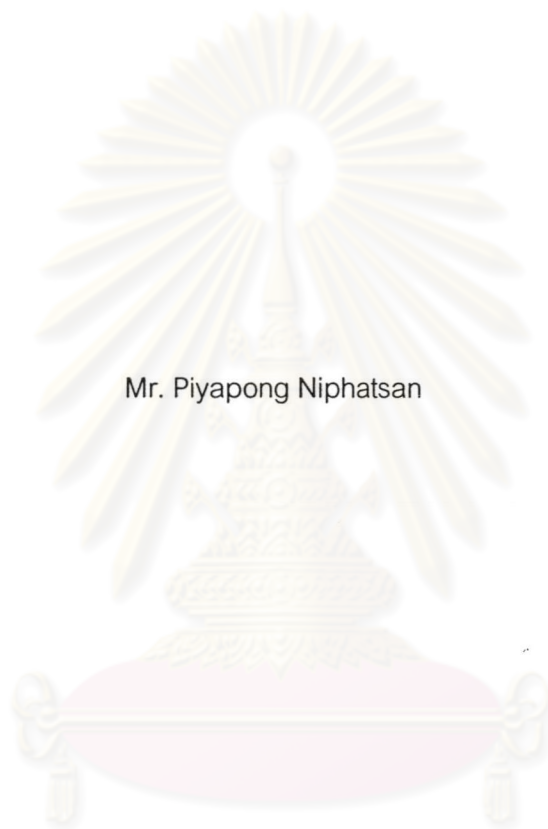
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-3721-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ANALYSIS OF QUASI PHASE MATCHED SECOND HARMONIC GENERATION IN
OPTICAL WAVEGUIDE BY FINITE ELEMENT BEAM PROPAGATION METHOD



Mr. Piyapong Niphatsan

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-3721-1

ปิยพงศ์ นิพัทธ์ศานต์ : การวิเคราะห์การกำเนิดฮาร์มอนิกอันดับสองแมตซ์เฟสแบบคล้ายใน
 ท่อนำคลื่นแสงโดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพากาเกชัน. (ANALYSIS OF QUASI
 PHASE MATCHED SECOND HARMONIC GENERATION IN OPTICAL WAVEGUIDE
 BY FINITE ELEMENT BEAM PROPAGATION METHOD) อ. ที่ปรึกษา :
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว, 186 หน้า. ISBN 974-17-3721-1.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีวิเคราะห์การกำเนิดฮาร์มอนิกอันดับสองในท่อนำคลื่นแสง
 แบบไม่เชิงเส้นที่อาศัยการแมตซ์เฟสแบบคล้ายโดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพากาเกชัน
 วิธีที่นำเสนอนี้สามารถคำนวณปัญหาท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาดได้ โดยอาศัยการใช้
 อีลีเมนต์ไอโซพาราเมตริกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคำนวณ นอกจากนี้ยังเสนอวิธีคำนวณ
 สมการคลื่นไม่เชิงเส้นแบบใหม่ที่มีความซับซ้อนน้อยกว่าวิธีการที่เคยมีผู้เสนอมานในอดีต วิธีการที่
 นำเสนอนี้ได้นำมาใช้ในการศึกษาเพื่อหาโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับการกำเนิดฮาร์มอนิก
 อันดับสองในท่อนำคลื่นแสงที่สร้างขึ้นจาก สารกึ่งตัวนำออลูมิเนียมแกเลียมอาร์เซनाยด์
 ผลึกลิเทียมไนโอเบต และผลึกลิเทียมแทนทาเลต

ผลการศึกษาพบว่า ท่อนำคลื่นแสงแบบไม่เชิงเส้นในทางปฏิบัติที่สร้างขึ้นจากผลึกลิเทียม-
 แทนทาเลตซึ่งมีค่าดรรชนีหักเหแสงเปลี่ยนแปลงแบบลาดและมีบริเวณโดเมนผกผันเป็นรูปครึ่งวงรีจะ
 เป็นโครงสร้างที่ให้กำลังฮาร์มอนิกอันดับสองสูงสุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....ปิยพงศ์ นิพัทธ์ศานต์.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....Pd.....
 ปีการศึกษา.....2546.....

4270681121 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: FINITE ELEMENT BEAM PROPAGATION / QUASI PHASE MATCHED

SECOND HARMONIC GENERATION / ISOPARAMETRIC ELEMENT

PIYAPONG NIPHATSAN : ANALYSIS OF QUASI PHASE MATCHED SECOND HARMONIC GENERATION IN OPTICAL WAVEGUIDE BY FINITE ELEMENT BEAM PROPAGATION METHOD. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. TUPTIM ANGKAEW Ph.D., 186 pp. ISBN 974-17-3721-1.

This thesis presents an analysis of second harmonic generation (SHG) in nonlinear optical waveguide with quasi phase matching technique by using the finite element beam propagation method. The proposed method has the ability to calculate the graded index optical waveguide problems. The isoparametric element is used for the enhancement of computational efficiency. In addition, this thesis proposes the new calculation method of nonlinear wave equation that has less complexity than the proposed conventional methods. The proposed method is used for studying of finding the properly structure for SHG in optical waveguides that are constructed from AlGaAs, LiNbO₃, and LiTaO₃.

It is found from the calculation results, the practical nonlinear optical waveguide that is constructed from LiTaO₃ has the graded index profile and semielliptic domain inversion shape that provide the maximum second harmonic power.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Electrical Engineering..... Student's signature..... *Piyapong Niphatsan*
Field of study.....Electrical Engineering..... Advisor's signature..... *Phd*
Academic year.....2003.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยและจัดหาอุปกรณ์การดำเนินการวิจัยให้แก่ผู้วิจัยอย่างครบถ้วน จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ชุมพล อันตรเสน และ รองศาสตราจารย์ ดร.ประยูทธ อัครเอกผาติน ที่ได้กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำต่างๆ ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ นายสุรพัทธ์ เจริญยิ่ง นายสุวิชาญ กาวาฮารา และ นายวรพงศ์ เพชรโพธิ์ทอง ที่ได้สละเวลาให้คำแนะนำและคำปรึกษาในงานวิทยานิพนธ์นี้

นอกจากนั้นขอขอบคุณสมาชิกห้องปฏิบัติการวิจัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้ตลอดมา

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาของผู้วิจัยที่ได้สนับสนุนด้านการเรียนและเป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัยตลอดเวลาที่ได้ศึกษาและดำเนินการวิจัยจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ธ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	9
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	9
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	9
1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย.....	10
บทที่ 2 การกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง.....	11
2.1 ความนำ.....	11
2.2 หลักการเบื้องต้นของการกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง.....	11
2.3 หลักการของการแมตซ์เฟสแบบคล้าย.....	18
2.4 อุปกรณ์ QPM-SHG.....	23
2.4.1 อุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ อลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์.....	23
2.4.2 อุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึกลิเทียมไนโอเบต.....	26
2.4.3 อุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึกลิเทียมแทนทาลेट.....	32
2.5 คาบของโครงสร้างรายคาบ.....	39
2.6 แนวคิดการวิเคราะห์การกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสองด้วย วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพagation.....	39
2.7 สรุป.....	43
บทที่ 3 การวิเคราะห์การกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสองในอุปกรณ์ QPM-SHG ด้วยวิธีสเกลาร์ไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพagation.....	44
3.1 ความนำ.....	44

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.2 การสร้างสมการสำหรับการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของแสง ภายในอุปกรณ์ QPM-SHG โดยอาศัยการประมาณแบบสเกลาร์.....	45
3.3 วิธีสเกลาร์ไฟไนต์อีลีเมนต์ปริมาตรเพื่อวิเคราะห์ การกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสองในอุปกรณ์ QPM-SHG.....	49
3.4 ผลการคำนวณในกรณีตัวอย่าง.....	54
3.4.1 อุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ อลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์.....	55
3.4.1.1 กรณีไม่แมตซ์เฟส.....	57
3.4.1.2 กรณีแมตซ์เฟสแบบคล้ายด้วยวิธีโดเมนผกผัน.....	60
3.4.1.3 กรณีแมตซ์เฟสแบบคล้ายด้วยวิธีกำจัด ความไม่เป็นเชิงเส้นในระยะครึ่งคาบ.....	63
3.5 สรุป.....	66
บทที่ 4 การวิเคราะห์การกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสองใน อุปกรณ์ QPM-SHG ด้วยวิธีเวกเตอร์ไฟไนต์อีลีเมนต์ปริมาตร.....	67
4.1 ความนำ.....	67
4.2 วิธีเวกเตอร์ไฟไนต์อีลีเมนต์ปริมาตรเพื่อวิเคราะห์ การกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง ในอุปกรณ์ QPM-SHG.....	68
4.3 ผลการคำนวณในกรณีตัวอย่าง.....	72
4.3.1 อุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึกลิเทียมแทนทาลेट.....	73
4.3.1.1 การทดสอบความแม่นยำของผลเฉลยที่คำนวณ ได้จากวิธีเวกเตอร์ไฟไนต์อีลีเมนต์ปริมาตร.....	80
4.3.1.2 ความแตกต่างของผลการคำนวณที่ได้รับการพิจารณา ด้วยการประมาณแบบสเกลาร์และแบบเวกเตอร์.....	84
4.3.1.3 ผลของค่าดรรชนีหักเหแสงแบบลาด.....	85
4.3.2 อุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึกลิเทียมไนโอเบต.....	93
4.3.2.1 โครงสร้างของโดเมนผกผันรูปสามเหลี่ยม ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแบบจำลองส่วนท่อนำคลื่นแสง แบบดรรชนีชั้นบันไดและแบบดรรชนีลาด.....	100

บทที่	สารบัญญ (ต่อ)	ณ หน้า
	4.3.2.2 ความแตกต่างของผลการคำนวณที่ได้การพิจารณา ด้วยการประมาณแบบสเกลาร์และแบบเวกเตอร์.....	103
	4.3.2.3 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการกำเนิด แสงฮาร์มอนิกอันดับสอง.....	105
	4.3.2.4 ผลของการเลือกใช้อันดับของโครงสร้างรายคาบ รูปสามเหลี่ยม.....	110
	4.3.3 อุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ อลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์.....	114
	4.3.3.1 ความแตกต่างของผลการคำนวณที่ได้การพิจารณา ด้วยการประมาณแบบสเกลาร์และแบบเวกเตอร์.....	116
	4.3.3.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการกำเนิด แสงฮาร์มอนิกอันดับสอง.....	117
	4.4 สรุป.....	121
บทที่ 5	บทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	122
	รายการอ้างอิง.....	125
	ภาคผนวก.....	131
	ภาคผนวก ก ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพรับไว้ได้ทางไฟฟ้า แบบไม่เชิงเส้นอันดับสองกับสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น.....	132
	ภาคผนวก ข สมการคลื่นแบบเวกเตอร์สำหรับวิเคราะห์ การกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง.....	134
	ภาคผนวก ค สมการคลื่นแบบสเกลาร์สำหรับวิเคราะห์ การกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง.....	138
	ภาคผนวก ง การพิสูจน์สมการของวิธีสเกลาร์ไฟไนต์อิลีเมนต์บีมพรอพาเกชัน.....	142
	ภาคผนวก จ การพิสูจน์สมการของวิธีเวกเตอร์ไฟไนต์อิลีเมนต์บีมพรอพาเกชัน.....	148
	ภาคผนวก ฉ พังก์ชันรูปร่างของอิลีเมนต์ไอโซพาราเมตริกรูปสามเหลี่ยม.....	159
	ภาคผนวก ช การประเมินสมรรถนะของอิลีเมนต์ไอโซพาราเมตริก.....	175
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	186

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตาราง 3.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการกำหนดโครงสร้างราคาของ อุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ $AlGaAs$	57
ตาราง 4.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการกำหนดโครงสร้างราคาของอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจาก ผลึก $LiTaO_3$ โดยส่วนท่อนำคลื่นแสงเป็นแบบดรรชนีชั้นบันได	76
ตาราง 4.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการกำหนดโครงสร้างราคาของอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึก $LiTaO_3$ โดยส่วนท่อนำคลื่นแสงเป็นแบบดรรชนีลาด (gaussian-gaussian distribution)	76
ตาราง 4.3 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการกำหนดโครงสร้างราคาของอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึก $LiTaO_3$ โดยส่วนท่อนำคลื่นแสงเป็นแบบแบบดรรชนีลาด (gaussian-exponential distribution)	76
ตาราง 4.4 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการกำหนดโครงสร้างราคาของอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึก $LiNbO_3$ โดยส่วนท่อนำคลื่นแสงเป็นแบบดรรชนีชั้นบันได	95
ตาราง 4.5 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการกำหนดโครงสร้างราคาของอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึก $LiNbO_3$ โดยส่วนท่อนำคลื่นแสงเป็นแบบดรรชนีลาด (gaussian-gaussian distribution)	96
ตาราง 4.6 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการกำหนดโครงสร้างราคาของอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึก $LiNbO_3$ โดยส่วนท่อนำคลื่นแสงเป็นแบบดรรชนีลาด (gaussian-exponential distribution)	96
ตาราง 4.7 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการกำหนดโครงสร้างราคาของอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ $AlGaAs$	115
ตาราง ก.1 ความสัมพันธ์ของตัวห้อยระหว่าง mn กับ p	133
ตาราง ฉ.1 ค่าของสัมประสิทธิ์นี้หน้าหนัก และ ค่าของพิกัดพื้นที่ สำหรับการอินทิเกรตเชิงตัวเลข	169

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 ท่อนำคลื่นแสงแบบ 3 มิติ.....	13
รูปที่ 2.2 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชัน $\sin(\Delta\beta l/2)/(\Delta\beta l/2)$ ตามระยะทางความยาว l ของท่อนำคลื่นแสง.....	17
รูปที่ 2.3 ความเข้มของแสงฮาร์มอนิกอันดับสองที่กำหนดขึ้น ภายในท่อนำคลื่นแสงแบบ 3 มิติ.....	18
รูปที่ 2.4 ลักษณะของฟังก์ชันการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันรายคาบ $d(z)$	20
รูปที่ 2.5 ความเข้มของแสงฮาร์มอนิกที่ถูกระบุโดยอาศัย วิธีการแมตซ์เฟสแบบคล้าย.....	22
รูปที่ 2.6 อุปกรณ์ QPM-SHG ที่มีสวอนโดเมนผกผันเป็นรูปสี่เหลี่ยม.....	22
รูปที่ 2.7 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ d สำหรับการแมตซ์เฟสแบบคล้าย โดยการใส่โครงสร้างรายคาบแบบโดเมนผกผัน.....	24
รูปที่ 2.8 อุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ อลูมิเนียมแกเลียมอาร์เซไนด์.....	25
รูปที่ 2.9 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ d สำหรับการแมตซ์เฟสแบบคล้าย โดยการใส่โครงสร้างรายคาบแบบกำจัดความไม่เป็นเชิงเส้นในระยะครึ่งคาบ.....	26
รูปที่ 2.10 ขั้นตอนการประดิษฐ์บริเวณโดเมนผกผันของ อุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึกลิเทียมไนโอเบต (ก) การปลูกฟิล์ม SiO_2 (ข) การ patterned โครงสร้างรายคาบ (ค) การแลกเปลี่ยนโปรตอน (ง) รูปร่างโดเมนผกผันที่เกิดขึ้นในทางปฏิบัติ.....	28
รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการประดิษฐ์ส่วนท่อนำคลื่นแสงของ อุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึกลิเทียมไนโอเบต (ก) การปลูกฟิล์ม Ta (ข) การ patterned ส่วนท่อนำคลื่นแสง (ค) การทำ dry etching (ง) การแลกเปลี่ยนโปรตอน.....	29
รูปที่ 2.12 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าดรรชนีหักเหแสงของท่อนำคลื่นแสงที่สร้างจาก ผลึกลิเทียมไนโอเบตด้วยวิธีแลกเปลี่ยนโปรตอน (ก) ภายหลังจาก แลกเปลี่ยนโปรตอน ที่อุณหภูมิ $240^\circ C$ โดยใช้ ระยะเวลาประมาณ 40 นาที (ข) ภายหลังจากกระบวนการ annealing ที่อุณหภูมิ $400^\circ C$ โดยใช้ระยะเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง.....	30

สารบัญญภาพ (ต่อ)

๗
หน้า

ภาพประกอบ	
รูปที่ 2.13 ขั้นตอนการประดิษฐ์บริเวณโดเมนผกผันของ อุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึกลิเทียมแทนทาลेट (ก) การปลูกฟิล์ม Ta (ข) การแลกเปลี่ยนโปรตอน (ค) โดเมนผกผันรูปครึ่งวงรีที่เกิดขึ้นในทางปฏิบัติ.....	37
รูปที่ 2.14 ขั้นตอนการประดิษฐ์ส่วนท่อนำคลื่นแสงของ อุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึกลิเทียมแทนทาลेट (ก) การปลูกฟิล์ม Ta (ข) การ patterned ส่วนท่อนำคลื่นแสง (ค) การแลกเปลี่ยนโปรตอน.....	38
รูปที่ 2.15 หลักการของการวิเคราะห์การกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสองด้วย วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ปีมพรอพาเกชัน (ก) อุปกรณ์ QPM-SHG (ข) การแบ่งมิติของตัวอุปกรณ์ QPM-SHG.....	42
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ QPM-SHG แบบ 3 มิติ.....	46
รูปที่ 3.2 การแบ่งภาคตัดขวาง Ω ของอุปกรณ์ QPM-SHG ออกเป็นอีลีเมนต์รูปสามเหลี่ยม Ω^e (ก) ภาคตัดขวาง Ω ในระนาบ xy (ข) อีลีเมนต์ Ω^e รูปสามเหลี่ยม.....	50
รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ ออลูมิเนียมแกเลียมอาร์เซไนด์.....	55
รูปที่ 3.4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของปัจจัย QPM_{factor} (ก) DI-QPM (ข) DD-QPM.....	56
รูปที่ 3.5 แบบรูปโมดนำของแสงมูลฐาน.....	57
รูปที่ 3.6 ขนาดขององค์ประกอบสนามไฟฟ้าหลัก E_x ของ แสงมูลฐาน (คอลัมน์ซ้ายมือ) และแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง (คอลัมน์ขวามือ) ที่ระยะโคฮีเรนซ์ต่างๆ ในกรณีไม่แมตซ์เฟส (ก) ระยะ L_c (ข) ระยะ $2L_c$ (ค) ระยะ $3L_c$ (ง) ระยะ $4L_c$ (จ) ระยะ $5L_c$ (ฉ) ระยะ $6L_c$	58
รูปที่ 3.7 การเปลี่ยนแปลงกำลังของแสงภายในอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจาก สารกึ่งตัวนำออลูมิเนียมแกเลียมอาร์เซไนด์ ในกรณีไม่แมตซ์เฟส (ก) แสงมูลฐาน (ข) แสงฮาร์มอนิกอันดับสอง.....	60

ภาพประกอบ

รูปที่ 3.8 ขนาดขององค์ประกอบสนามไฟฟ้าหลัก E_x ของ แสงมูลฐาน (คอลัมน์ซ้ายมือ) และแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง (คอลัมน์ขวามือ) ที่ระยะโคฮีเรนซ์ต่างๆ ในกรณีเมตซ์เฟสแบบคล้ายด้วยวิธีโดเมนผกผัน (ก) ระยะ L_c (ข) ระยะ $2L_c$ (ค) ระยะ $3L_c$ (ง) ระยะ $4L_c$ (จ) ระยะ $5L_c$ (ฉ) ระยะ $6L_c$	61
รูปที่ 3.9 การเปลี่ยนแปลงกำลังของแสงภายในอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำออลูมิเนียมแกเลียมอาร์เซไนด์ ในกรณีเมตซ์เฟสแบบคล้ายด้วยวิธีโดเมนผกผัน (ก) แสงมูลฐาน (ข) แสงฮาร์มอนิกอันดับสอง.....	63
รูปที่ 3.10 ขนาดขององค์ประกอบสนามไฟฟ้าหลัก E_x ของ แสงมูลฐาน (คอลัมน์ซ้ายมือ) และแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง (คอลัมน์ขวามือ) ที่ระยะโคฮีเรนซ์ต่างๆ ในกรณีเมตซ์เฟสแบบคล้ายด้วยวิธีกำจัดความไม่เป็นเชิงเส้นในระยะครึ่งคาบ (ก) ระยะ L_c (ข) ระยะ $2L_c$ (ค) ระยะ $3L_c$ (ง) ระยะ $4L_c$ (จ) ระยะ $5L_c$ (ฉ) ระยะ $6L_c$	64
รูปที่ 3.11 การเปลี่ยนแปลงกำลังของแสงภายในอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำออลูมิเนียมแกเลียมอาร์เซไนด์ ในกรณีเมตซ์เฟสแบบคล้ายด้วยวิธีกำจัดความไม่เป็นเชิงเส้นในระยะครึ่งคาบ.....	66
รูปที่ 4.1 อุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึกลิเทียมแทนทาเลต.....	73
รูปที่ 4.2 แบบรูปโมดนำขององค์ประกอบสนามไฟฟ้าในแนวขวาง (คอลัมน์ซ้ายมือ) และองค์ประกอบสนามไฟฟ้าในแนวเคลื่อนที่ (คอลัมน์ขวามือ) ของแสงมูลฐาน (ก) ท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีขั้นบันได (ข) ท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาด (gaussian-gaussian distribution) (ค) ท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาด (gaussian-exponential distribution).....	77
รูปที่ 4.3 ขนาดของสมาชิกในแนวทแยงของเทนเซอร์สภาพยอมในบริเวณแกนนำแสง ซึ่งแปรตามระยะทางในแนวแกน x และแกน y แบบฟังก์ชันเกาส์เซียน ที่ความยาวคลื่นมูลฐาน(คอลัมน์ด้านซ้าย) และความยาวคลื่นฮาร์มอนิกอันดับสอง (คอลัมน์ด้านขวา) (ก) ϵ_{xx} (ข) ϵ_{yy} (ค) ϵ_{zz}	78

ภาพประกอบ

หน้า

รูปที่ 4.4 ขนาดของสมาชิกในแนวทแยงของเทนเซอร์สภาพยอมในบริเวณแกนนำแสง ซึ่งแปรตามระยะทางในแนวแกน x แบบฟังก์ชันเกาส์เซียน และแกน y แบบฟังก์ชันเอกโพเนนเชียลที่ความยาวคลื่นมูลฐาน (คอลัมน์ด้านซ้าย) และความยาวคลื่นฮาร์มอนิกอันดับสอง (คอลัมน์ด้านขวา) (ก) ϵ_{xx} (ข) ϵ_{yy} (ค) ϵ_{zz}	79
รูปที่ 4.5 แบบจำลองโดเมนผกผันรูปครึ่งวงรีของอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึกลิเทียมแทนทาลेट	80
รูปที่ 4.6 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความสูง b ตามความกว้าง a ของ โดเมนผกผันรูปครึ่งวงรี (Mizuuchi and Yamamoto, 1992)	80
รูปที่ 4.7 แบบจำลองโดเมนผกผันของอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจาก ผลึกลิเทียมแทนทาลेटสำหรับการคำนวณหาความกว้าง a ที่เหมาะสมที่สุด (ก) แบบจำลองรูปครึ่งวงรี (ข) แบบจำลองผสมระหว่างรูปสี่เหลี่ยมกับครึ่งวงรี	81
รูปที่ 4.8 การแบ่งภาคตัดขวางของอุปกรณ์ QPM SHG ออกเป็น อิลีเมนต์ไอโซพาราเมตริก CT/LN จำนวน 1,278 อิลีเมนต์	82
รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบกำลังของแสงฮาร์มอนิกที่คำนวณได้จากแบบจำลอง โดเมนผกผัน 2 แบบกับผลการทดลองของ Mizuuchi and Yamamoto (1992) (ก) ส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีขั้นบันได (ข) ส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาด (gaussian-gaussian distribution) (ค) ส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาด (gaussian-exponential distribution)	83
รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบกำลังของแสงฮาร์มอนิกอันดับสองที่คำนวณได้จาก วิธีสเกลาร์ไฟไนต์อิลีเมนต์บีมพรอพากชัน กับ วิธีเวกเตอร์ไฟไนต์อิลีเมนต์บีมพรอพากชัน	85
รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสองของ อุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึกลิเทียมแทนทาลेटโดยใช้แบบจำลองของ บริเวณโดเมนผกผันเป็นแบบผสมระหว่างรูปสี่เหลี่ยมกับครึ่งวงรี	86

ภาพประกอบ

หน้า

รูปที่ 4.12 แบบรูปสนามไฟฟ้าของแสงมูลฐาน (คอลลิมน์ซ้ายมือ) และ แสงฮาร์มอนิกอันดับสอง (คอลลิมน์ขวามือ) ที่ระนาบสุดท้ายของการคำนวณ ในส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีชั้นบันได (ก) องค์ประกอบ E_x (ข) องค์ประกอบ E_y , (ค) องค์ประกอบ E_z	87
รูปที่ 4.13 แบบรูปสนามไฟฟ้าของแสงมูลฐาน (คอลลิมน์ซ้ายมือ) และ แสงฮาร์มอนิกอันดับสอง(คอลลิมน์ขวามือ) ที่ระนาบสุดท้ายของ การคำนวณในส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาดที่มีฟังก์ชันการ กระจายในแนวแกน x และ y เป็นฟังก์ชันเกาส์เซียน (ก) องค์ประกอบ E_x (ข) องค์ประกอบ E_y , (ค) องค์ประกอบ E_z	88
รูปที่ 4.14 ลักษณะโครงสร้างราคาบที่มีอันดับและดิวตี้ไซเคิลต่างกัน (ก) โครงสร้างราคาบอันดับ 1 และ ดิวตี้ไซเคิลเท่ากับ 50% (ข) โครงสร้างราคาบอันดับ 2 และ ดิวตี้ไซเคิลเท่ากับ 25% (ค) โครงสร้างราคาบอันดับ 3 และ ดิวตี้ไซเคิลเท่ากับ 50%	90
รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบผลของการเลือกใช้อันดับของโครงสร้างราคาบโดยใช้ แบบจำลองบริเวณโดเมนผกผันเป็นแบบผสมระหว่างรูปสี่เหลี่ยมกับครึ่งวงรี (ก) ส่วนท่อนำคลื่นแสงเป็นแบบดรรชนีชั้นบันได (ข) ส่วนท่อนำคลื่นแสงเป็นแบบดรรชนีลาด (gaussian-gaussian distribution) (ค) ส่วนท่อนำคลื่นแสงเป็นแบบดรรชนีลาด (gaussian-exponential distribution)	91
รูปที่ 4.16 อุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึก $LiNbO_3$	93
รูปที่ 4.17 ขนาดของสมาชิกในแนวทแยงของเทนเซอร์สภาพยอมในแกนนำแสงซึ่งแปรตาม ระยะทางในแนวแกน x และ y แบบฟังก์ชันเกาส์เซียน ที่ ความยาวคลื่นมูลฐาน (คอลลิมน์ด้านซ้าย)และความยาวคลื่นฮาร์มอนิกอันดับสอง (คอลลิมน์ด้านขวา) (ก) ϵ_{xx} (ข) ϵ_{yy} (ค) ϵ_{zz}	97

ภาพประกอบ

รูปที่ 4.18 ขนาดของสมาชิกในแนวทแยงของเทนเซอร์สภาพยอมในแกนนำแสงซึ่งแปรตามระยะทางในแนวแกน x แบบฟังก์ชันเกาส์เซียน และแกน y แบบฟังก์ชันเอกโพเนนเชียลที่ความยาวคลื่นมูลฐาน (คอลัมน์ด้านซ้าย) และความยาวคลื่นฮาร์มอนิกอันดับสอง (คอลัมน์ด้านขวา)	
(ก) ϵ_{xx} (ข) ϵ_{yy} (ค) ϵ_{zz}	98
รูปที่ 4.19 แบบรูปโมดนำขององค์ประกอบสนามไฟฟ้าในแนวขวาง (คอลัมน์ซ้ายมือ) และองค์ประกอบสนามไฟฟ้าในแนวเคลื่อนที่ (คอลัมน์ขวามือ) ของแสงมูลฐาน.	
(ก) ท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีชั้นบันได	
(ข) ท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาด (gaussian-gaussian distribution)	
(ค) ท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาด (gaussian-exponential distribution)	99
รูปที่ 4.20 แบบจำลองโดเมนผกผันรูปสามเหลี่ยมของอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึกลิเทียมไนโอเบต	100
รูปที่ 4.21 การแบ่งภาคตัดขวางของอุปกรณ์ QPM SHG ออกเป็น อิลิมেন্টไอโซพาราเมตริก CT/LN จำนวน 1,104 อิลิมেন্ট	101
รูปที่ 4.22 กำลังของแสงฮาร์มอนิกอันดับสองที่ถูกกำเนิดขึ้นเมื่อกำหนดให้ความสูง b ของโดเมนผกผันรูปสามเหลี่ยมเป็นตัวพารามิเตอร์แปรค่า	
(ก) ส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีชั้นบันได	
(ข) ส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาด (gaussian-gaussian distribution)	
(ค) ส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาด (gaussian-exponential distribution)	102
รูปที่ 4.23 การเปรียบเทียบกำลังของแสงฮาร์มอนิกอันดับสองที่คำนวณได้จาก วิธีสเกลาร์ไฟไนต์อิลิมেন্টบีมพรอพagation กับ วิธีเวกเตอร์ไฟไนต์อิลิมেন্টบีมพรอพagation	
(ก) ส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีชั้นบันได	
(ข) ส่วนท่อนำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาด (gaussian-gaussian distribution)	104
รูปที่ 4.24 รูปร่างบริเวณโดเมนผกผันของอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างขึ้นจากผลึกลิเทียมไนโอเบต (ก) รูปสี่เหลี่ยม (ข) รูปสามเหลี่ยม	105

ภาพประกอบ

รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสองของ อุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึกลิเทียมไนโอเบตโดยมีบริเวณ โดเมนผกผันเป็นรูปสามเหลี่ยม (ก) บริเวณโดเมนผกผันรูปสี่เหลี่ยม (ข) บริเวณโดเมนผกผันรูปสามเหลี่ยม.....	107
รูปที่ 4.26 แบบรูปสนามไฟฟ้าของแสงมูลฐาน (คอลัมน์ซ้ายมือ) และ แสงฮาร์มอนิกอันดับสอง (คอลัมน์ขวามือ) ที่ระนาบสุดท้ายของ การคำนวณในส่วนที่นำคลื่นแสงแบบดรรชนีขึ้นบันได (ก) องค์ประกอบ E_x (ข) องค์ประกอบ E_y (ค) องค์ประกอบ E_z	108
รูปที่ 4.27 แบบรูปสนามไฟฟ้าของแสงมูลฐาน (คอลัมน์ซ้ายมือ) และ แสงฮาร์มอนิกอันดับสอง (คอลัมน์ขวามือ) ที่ระนาบสุดท้ายของการคำนวณ ในส่วนที่นำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาดที่มีฟังก์ชันการกระจาย ในแนวแกน x และ y เป็นฟังก์ชันเกาส์เซียน (ก) องค์ประกอบ E_x (ข) องค์ประกอบ E_y (ค) องค์ประกอบ E_z	109
รูปที่ 4.28 ลักษณะการแบ่งอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึกลิเทียมไนโอเบต ออกเป็นระนาบในแนวขวางเพื่อการคำนวณผลของอันดับของ โครงสร้างรายคาบที่มีต่อกำลังของแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง (ก) โครงสร้างรายคาบอันดับ 1 และ ดิวตี้ไซเคิลเท่ากับ 50 % (ข) โครงสร้างรายคาบอันดับ 2 และ ดิวตี้ไซเคิลเท่ากับ 50 %.....	111
รูปที่ 4.29 การเปรียบเทียบผลของการเลือกใช้อันดับของโครงสร้างรายคาบ ของอุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากผลึกลิเทียมไนโอเบตโดยมี บริเวณโดเมนผกผันเป็นรูปสามเหลี่ยม (ก) ส่วนที่นำคลื่นแสงแบบดรรชนีขึ้นบันได (ข) ส่วนที่นำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาด (gaussian-gaussian distribution) (ค) ส่วนที่นำคลื่นแสงแบบดรรชนีลาด (gaussian-exponential distribution).....	112
รูปที่ 4.30 อุปกรณ์ QPM-SHG ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ อลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์.....	114

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ต

ภาพประกอบ

หน้า

รูปที่ 4.31 แบบรูปสนามไฟฟ้าโมดนำของแสงมูลฐาน	
(ก) องค์ประกอบสนามไฟฟ้าในแนวขวาง	
(ข) องค์ประกอบสนามไฟฟ้าในแนวเคลื่อนที่.....	115
รูปที่ 4.32 การแบ่งภาคตัดขวางของอุปกรณ์ QPM SHG ออกเป็น	
อิลีเมนต์ไอโซพาราเมตริกสามเหลี่ยมจำนวน 1,054 อิลีเมนต์.....	115
รูปที่ 4.33 การเปรียบเทียบกำลังของแสงฮาร์มอนิกอันดับสองที่คำนวณได้จาก	
วิธีสเกลาร์ไฟไนต์อิลีเมนต์บีมพรอพากेशन กับ	
วิธีเวกเตอร์ไฟไนต์อิลีเมนต์บีมพรอพากेशन.....	116
รูปที่ 4.34 การเปรียบเทียบกำลังของแสงมูลฐานและแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง	
ในกรณีแมตซ์เฟสแบบคล้ายด้วยวิธีโดเมนผกผันโดยอาศัย	
โครงสร้างรายคาบที่มีอันดับและดิวตี้ไซเคิลต่างกัน	
(ก) แสงมูลฐาน (ข) แสงฮาร์มอนิกอันดับสอง.....	118
รูปที่ 4.35 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง	
ในกรณีแมตซ์เฟสแบบคล้ายด้วยวิธีโดเมนผกผันโดยอาศัยโครง	
สร้างรายคาบที่มีอันดับและดิวตี้ไซเคิลต่างกัน.....	118
รูปที่ 4.36 การเปรียบเทียบกำลังของแสงมูลฐานและแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง	
ในกรณีแมตซ์เฟสแบบคล้ายด้วยวิธีกำจัดความไม่เป็นเชิงเส้นในระยะ	
ครึ่งคาบโดยอาศัยโครงสร้างรายคาบที่มีอันดับ และดิวตี้ไซเคิลต่างกัน.....	120
รูปที่ 4.37 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง	
ในกรณีแมตซ์เฟสแบบคล้ายด้วยวิธีกำจัดความไม่เป็นเชิงเส้นในระยะ	
ครึ่งคาบโดยอาศัยโครงสร้างรายคาบที่มีอันดับและดิวตี้ไซเคิลต่างกัน.....	120
รูปที่ ฉ 1 อิลีเมนต์รูปสามเหลี่ยมอันดับหนึ่ง.....	159
รูปที่ ฉ 2 อิลีเมนต์รูปสามเหลี่ยมอันดับสอง.....	161
รูปที่ ฉ 3 การแปลงระบบพิกัดสำหรับอิลีเมนต์ไอโซพาราเมตริก	
(ก) อิลีเมนต์ไอโซพาราเมตริกอันดับหนึ่ง (ข) อิลีเมนต์ไอโซพาราเมตริกอันดับสอง....	163
รูปที่ ฉ 4 ลักษณะของอิลีเมนต์ไอโซพาราเมตริก CT/LN ในระบบพิกัดกายภาพ xy	165

ภาพประกอบ

รูปที่ ฉ 5	ฟังก์ชันรูปร่างแบบเวกเตอร์สำหรับอิลีเมนต์ไอโซพาราเมตริก CT/LN ที่มีจุดยอดหมายเลข 1 2 และ 3 อยู่ที่พิกัด (0,1) (0,0) และ (1,0) ตามลำดับ	
	(ก) องค์ประกอบ $a_x U_1 + a_y V_1$ (ข) องค์ประกอบ $a_x U_2 + a_y V_2$	
	(ค) องค์ประกอบ $a_x U_3 + a_y V_3$	168
รูปที่ ฉ 6	ลักษณะของอิลีเมนต์ไอโซพาราเมตริกแบบ LT/LN ในระบบพิกัดกายภาพ xy	169
รูปที่ ฉ 7	ฟังก์ชันรูปร่างแบบเวกเตอร์สำหรับอิลีเมนต์ไอโซพาราเมตริก LT/LN ที่มีจุดยอดหมายเลข 1 2 และ 3 อยู่ที่พิกัด (0,1) (0,0) และ (1,0) ตามลำดับ.....	173
รูปที่ ช 1	ท่อนำคลื่นแสงแบบบริบ.....	176
รูปที่ ช 2	ลักษณะของการแบ่งหน้าตัดของท่อนำคลื่นแสงแบบบริบออกเป็นอิลีเมนต์ไอโซพาราเมตริกแบบขอบตรง.....	176
รูปที่ ช 3	การเปรียบเทียบค่าดรรชนีหักเหแสงประสิทธิผลที่คำนวณได้ของท่อนำคลื่นแสงแบบบริบกับผลการคำนวณของ Koshiba et al. (1992)	
	(ก) โมดหลัก E_{11}^x (ข) โมดหลัก E_{11}^y	177
รูปที่ ช 4	ท่อนำคลื่นแสงฝังในแผ่นฐานแบบชั้นบันได.....	178
รูปที่ ช 5	ลักษณะการแบ่งหน้าตัดของท่อนำคลื่นแสงฝังในแผ่นฐานแบบ ชั้นบันได ออกเป็นอิลีเมนต์ไอโซพาราเมตริกแบบขอบตรง.....	178
รูปที่ ช 6	การเปรียบเทียบค่าดรรชนีหักเหแสงประสิทธิผลของโมดหลัก E_{11}^y ที่คำนวณได้กับผลการคำนวณของ Koshiba et al. (1992: 89-91).....	179
รูปที่ ช 7	ท่อนำคลื่นแสงฝังในแผ่นฐานแบบดรรชนีลาด.....	180
รูปที่ ช 8	ลักษณะการแบ่งหน้าตัดของท่อนำคลื่นแสงฝังในแผ่นฐานแบบดรรชนีลาด ออกเป็นอิลีเมนต์ไอโซพาราเมตริกแบบขอบตรง.....	181
รูปที่ ช 9	การเปรียบเทียบค่าดรรชนีหักเหแสงประสิทธิผลของโมดหลัก E_{11}^y ที่คำนวณได้กับผลการคำนวณของ Katsriku , Rahman and Grattan (1996)	
	(ก) gaussian-gaussian distribution	
	(ข) gaussian-exponential distribution.....	182
รูปที่ ช 10	เส้นใยแสงแบบดรรชนีลาด.....	182
รูปที่ ช 11	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าดรรชนีหักเหแสงตามระยะทางในแนวรัศมีของเส้นใยแสง	
	(ก) triangular index ($\alpha = 1$) (ข) parabolic index ($\alpha = 2$).....	184

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ท
หน้า

ภาพประกอบ

รูปที่ ข 12 ลักษณะการแบ่งหน้าตัดของเส้นใยแสงออกเป็นอิลีเมนต์ไอโซพาราเมตริก

(ก) อิลีเมนต์ขอบตรงจำนวน 445 อิลีเมนต์

(ข) อิลีเมนต์ขอบโค้งจำนวน 108 อิลีเมนต์.....184

รูปที่ ข 13 คุณสมบัติการแพร่กระจายในโหมด HE_{11} ของเส้นใยแสงที่มีดรรชนีหักเหแสง

เป็นแบบดรรชนีลาด (α -power) (ก) triangular-index ($\alpha = 1$)

(ข) parabolic-index ($\alpha = 2$).....185



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์	ความหมาย
E	สนามไฟฟ้า
H	สนามแม่เหล็ก
D	ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า
P	โพลาไรเซชัน
χ	สภาพรับไว้ได้ทางไฟฟ้า
ϵ_0	สภาพยอมของอวกาศว่าง
μ_0	ความซาบซึมได้ของอวกาศว่าง
$[d]$	เทนเซอร์สัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น
$[\epsilon_r]$	เทนเซอร์สภาพยอมสัมพัทธ์ของตัวกลาง
β	ค่าคงตัวการแพร่กระจาย
$\Delta\beta$	ปัจจัยการไม่แมตซ์กันทางเฟส
η_{SHG}	ประสิทธิภาพการกำเนิดแสงฮาร์มอนิกอันดับสอง
k_0	เวฟนัมเบอร์ในอวกาศว่าง
ω	ความถี่เชิงมุม
Λ	คาบของโครงสร้างรายคาบ
Ω	ภาคตัดขวางของท่อนำคลื่น
Ω^e	บริเวณภายในอีลีเมนต์
I	ความเข้มของแสง
$I_{overlap}$	อินทิกรัลแสดงการทับซ้อน
L_c	ระยะโคฮีเรนซ์
n	ค่าดัชนีหักเหแสง
N_{eff}	ค่าดัชนีหักเหแสงประสิทธิผล