

การตรวจสอบค่าการสูญเสียในโฮลีย์ไฟเบอร์ชนิดเรียงตัวแบบหกเหลี่ยม

INVESTIGATION ON LOSS OF HEXAGONAL ARRANGEMENT IN HOLEY
FIBER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

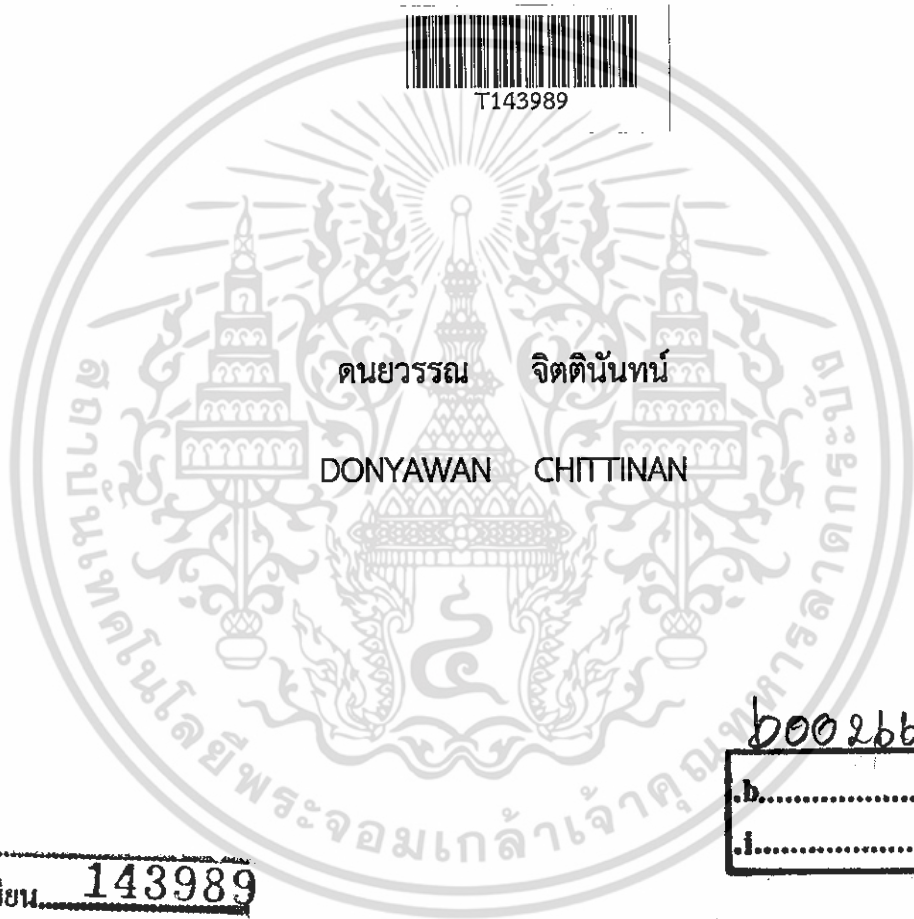
KMITL-2016-SC-M-030-022

การตรวจสอบค่าการสูญเสียในโพลีเมอร์ชนิดเรียงตัวแบบหกเหลี่ยม

INVESTIGATION ON LOSS OF HEXAGONAL ARRANGEMENT IN HOLEY
FIBER



T143989



दनयवรวण जलतलननन
DONYAWAN CHITTINAN

600266202

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

สขพมู.....
เลขทะเบียน 143989
วันเดือนปี 10 มี.ค. 2559

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

INVESTIGATION ON LOSS OF HEXAGONAL ARRANGEMENT IN HOLEY
FIBER



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

DEPARTMENT OF PHYSICS

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2016

KMITL-2016-SC-M-030-022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF SCIENCE

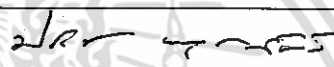
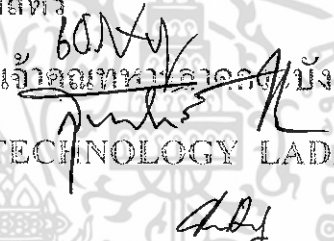
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ “การตรวจสอบค่าการสูญเสียในโฮลีย์ไฟเบอร์ชนิดเรียงตัวแบบหกเหลี่ยม”
“INVESTIGATION ON LOSS OF HEXAGONAL ARRANGEMENT IN HOLEY FIBER”

ชื่อนักศึกษา นางสาวदनยวรรณ จิตตินันท์
รหัสประจำตัว 57605076
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.สาทร่าย เล็กชะอ่อม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ประธาน บุรณศิริ ประธานกรรมการ ผศ.ดร.เชษฐา รัตนพันธ์ อาจารย์บัณฑิตประจำ (ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง) รศ.ดร.สุศักดิ์ เชียงกา รศ.สาทร่าย เล็กชะอ่อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	 คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง KING INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG 

วัน/ เดือน/ ปี ที่สอบ 7 กรกฎาคม เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง 307 อาคารจุฬารามณ์วิทยาลัย ชั้น 1

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว
(รองศาสตราจารย์ ดร. ดุษณี ธนะบริพัทธ์)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
วันที่ ๗ กรกฎาคม ๒๕๖๓ พ.ศ. ๕๖๓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การตรวจสอบค่าการสูญเสียในโฮลีย์ไฟเบอร์ชนิดเรียงตัวแบบ หกเหลี่ยม
ชื่อนักศึกษา	นางสาวदनยวรรณ จิตตินันท์
รหัสประจำตัว	57605076
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชา	ฟิสิกส์
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ สาทราย เล็กชะอุ่ม

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการตรวจสอบค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสงที่เป็นแลตทิซแบบหกเหลี่ยม โดยโครงสร้างที่ทำการออกแบบคือ พิว รูปร่างของรู และขนาดของรูอากาศ ในโหมดที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่ของโฮลีย์ไฟเบอร์ชนิดเรียงตัวแบบหกเหลี่ยมที่ประกอบด้วยรูของอากาศ 5 ชั้น ซึ่งวัสดุที่ใช้คือซิลิกาบริสุทธิ์ โดยทำการใช้โปรแกรม OptiFDTD ที่ใช้หลักการพื้นฐานแบบจำลองคณิตศาสตร์ของวิธีผลต่างสี่บเนื่องจำกัดโดเมนเวลาและมีค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 1.55 ไมครอน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงการเปรียบเทียบกันระหว่างโฮลีย์ไฟเบอร์ที่มีขนาดของรูอากาศที่แต่ละชั้นเท่ากันที่ $d=0.3 \mu\text{m}$ จะได้ค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสงเท่ากับ 0.021011 และขนาดของรูอากาศที่แต่ละชั้นแตกต่างกัน ซึ่ง 3 ชั้นด้านในมีค่า $d=0.3 \mu\text{m}$ และ 2 ชั้นด้านนอกมีค่า $d=0.5 \mu\text{m}$ โดยเราจะพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนรูอากาศให้มีขนาดแตกต่างกันที่ 3 ชั้นด้านในมีค่า $d=0.3 \mu\text{m}$ และ 2 ชั้นด้านนอกมีค่า $d=0.5 \mu\text{m}$ จะได้ค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสงเท่ากับ 0.016627 ซึ่งมีค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับโฮลีย์ไฟเบอร์ที่มีขนาดของรูอากาศที่ค่า $d=0.3 \mu\text{m}$ ทุกชั้น

คำสำคัญ : การสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสง, ผลึกโฟโตนิกส์, โฮลีย์ไฟเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Investigation on loss of hexagonal arrangement in holey fiber
Student Name	Donyawan Chittinan
Student ID	57605076
Degree	Master of Science
Department	Physics
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Sarai Lekchaum

ABSTRACT

This paper investigated the confinement loss of hexagonal lattice by structure designed of pitch, shape of holes and air hole size of Large Mode Area (LMA) holey fiber with hexagonal arrangement and the normalized holes consists of 5-layer, it's made from pure silica. By using the OptiFDTD programming based on the finite-difference time-domain (FDTD) method and its wavelength is 1.55 micron, the result shows that the comparative between the normalized hole diameter in 5-layer balanced that $d=0.3 \mu\text{m}$ and the normalized diameter in various layers of hexagonal different that the diameter of inside 3-layer equal to $0.3 \mu\text{m}$ and outer 2-layer equal to $0.5 \mu\text{m}$, we have been found the confinement loss equal to 0.016627 when the diameter of inside 3-layer and outer 2-layer is changed to low confinement loss.

Keywords : confinement loss, finite difference time domain , holey fiber, Photonic crystal fiber

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ สาหร่าย เล็กชะอุ่ม ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและชี้แนะแนวทางการศึกษา ขอขอบคุณ อาจารย์ สุรชาติ กมลติก ที่คอยให้คำแนะนำการดำเนินงานวิจัยและตรวจแก้ไขในการดำเนินงานวิจัย ผู้วิจัยมีความซาบซึ้งและถือเป็นพระคุณอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

นอกจากนี้ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ได้ทำการจัดซื้อโปรแกรม OptiFDTD ของบริษัท Optiwave Inc. ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งในงานวิจัยฉบับนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ในสาขาฟิสิกส์ทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้ความรู้ ให้คำแนะนำ และให้ความคิดเห็นเป็นอย่างดีเสมอมา ทำให้ได้ข้อมูลครบถ้วนในการวิจัยครั้งนี้

คุณงามความดีอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพ ยิ่งและคณาจารย์ผู้ประสาทวิชาความรู้ ตลอดจนทุกๆท่านที่ให้กำลังใจช่วยเหลือตลอดจนกระทั่ง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

นางสาวदनยวรรณ จิตตินันท์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
คำย่อและสัญลักษณ์.....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีในการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับผลึกโฟโตนิกส์.....	4
2.2 คลื่นระนาบแบบ 2 มิติ.....	7
2.3 การเกิดความบกพร่องแบบจุด.....	16
2.4 การเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแสง.....	22
2.5 สมการแมกซ์เวลล์.....	26
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	32
3.1 วิธีผลต่างสี่บเนื่องจำกัดโดเมนเวลา.....	32
3.2 สมการของวิธีผลต่างสี่บเนื่องจำกัดโดเมนเวลาในระบบ 2 มิติ.....	32
3.3 คลื่นที่มีแนวสนามไฟฟ้าวางตามขวาง.....	33
3.4 คลื่นที่มีแนวสนามแม่เหล็กวางตามขวาง.....	36
3.5 ขั้นตอนการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม OptiFDTD.....	39
3.6 การออกแบบโครงสร้างของผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.7 ค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสง.....	43
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	45
4.1 โครงสร้างผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ ที่มีการจัดเรียงตัวแบบหกเหลี่ยม.....	45
4.2 การจำลองการออกแบบผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติที่มีการจัดเรียงตัวแบบหกเหลี่ยม	46
4.3 การวิเคราะห์ผลผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ ที่มีการจัดเรียงตัวแบบหกเหลี่ยม.....	49
บทที่ 5 สรุปผลการจำลองและงานวิจัยในอนาคต.....	54
5.1 สรุปผลการจำลอง.....	54
5.2 งานวิจัยในอนาคต.....	54
เอกสารอ้างอิง.....	55
ภาคผนวก.....	56
ภาคผนวก ก. งานวิจัยที่ได้นำเสนอในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ.....	57
ประวัติผู้เขียน.....	64

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ข้อมูลของค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสงในผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ d=0.3 μm	50
4.2 ข้อมูลของค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสงในผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ d=0.5 μm	51
4.3 ข้อมูลของค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสงในผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ d1,d2,d3=0.3 μm และ d4,d5=0.5 μm	52



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ประเภทของโครงสร้างผลึกโฟโตนิกส์.....	4
2.2 โครงสร้างผลึกโฟโตนิกส์ในรูปแบบ 1 มิติ.....	5
2.3 โครงสร้างที่จัดเรียงแบบสามเหลี่ยมของผลึกโฟโตนิกส์ในรูปแบบ 2 มิติ.....	6
2.4 โครงสร้างผลึกโฟโตนิกส์ในรูปแบบ 3 มิติ.....	6
2.5 แลตทิซแบบสี่เหลี่ยม.....	8
2.6 แลตทิซแบบสามเหลี่ยม.....	9
2.7 แผนภาพเมซของหน่วยเซลล์สำหรับการหาปริพันธ์ด้วยวิธีเชิงตัวเลข.....	10
2.8 ผังงาน (flowchart) สำหรับการคำนวณของแถบโครงสร้างผลึกโฟโตนิกส์.....	15
2.9 ผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ เป็นแลตทิซแบบสี่เหลี่ยม.....	16
2.10 โครงสร้างของซูเปอร์เซลล์ที่ความบกพร่องแบบจุดซึ่งวิเคราะห์โดยการใช PWEM.....	18
2.11 การวิเคราะห์ซูเปอร์เซลล์ของความบกพร่องแบบจุด	18
2.12 แอมพลิจูดของสนามที่โหนดควัตี่.....	19
2.13 ความบกพร่องแบบจุดที่ประกอบไปด้วยรูอากาศที่หายไปโนซิติกาสแลบ	21
2.14 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	23
2.15 แสดงลูกคลื่น.....	24
2.16 กฎของเกาส์สำหรับสนามไฟฟ้า.....	26
2.17 กฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็ก.....	27
2.18 ขดลวดโซลินอยด์.....	27
3.1 แสดงการคำนวณเชิงตัวเลขของขอบเขตในระบบ 2 มิติ.....	33
3.2 ตำแหน่งสนามไฟฟ้าของคลื่นที่มีแนวสนามไฟฟ้าวางตามขวางในระบบ 2 มิติ.....	34
3.3 ตำแหน่งสนามแม่เหล็กของคลื่นที่มีแนวสนามแม่เหล็กวางตามขวางในระบบ 2 มิติ.....	37
3.4 Flow Chart ของการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี FDTD ในโปรแกรม OptiFDTD..	39
3.5 การออกแบบโดยใช้ PBG Crystal Structure.....	40
3.6 การ simulation แบบ 2D Simulation.....	41
3.7 ลักษณะการจัดเรียงตัวของท่อนำคลื่นในโฮลีย์ไฟเบอร์.....	41
3.8 การออกแบบโครงสร้างของท่อนำคลื่นของผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ ที่ $d=0.5 \mu\text{m}$	42
3.9 การออกแบบโครงสร้างของท่อนำคลื่นของผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ ที่ $d=0.3 \mu\text{m}$	42
3.10 การออกแบบโครงสร้างของท่อนำคลื่นของผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ ที่ค่า d แตกต่างกัน....	43
4.1 แถบช่องว่างเชิงแสงแบบโหมด TE (จากโปรแกรม OptiFDTD).....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 การออกแบบผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ ที่มีการเรียงตัวแบบหกเหลี่ยม โดยเปลี่ยนขนาดของรูอากาศเท่ากันทุกวง.....	47
4.3 รูปแบบการแสดงผลแบบ Image map โดยขนาดของรูอากาศเท่ากันทุกวง.....	47
4.4 รูปแบบการแสดงผลแบบ Height Plot โดยขนาดของรูอากาศเท่ากันทุกวง.....	47
4.5 การออกแบบผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ ที่มีการเรียงตัวแบบหกเหลี่ยม โดยเปลี่ยนขนาดของรูอากาศให้แต่ละวงแตกต่างกัน.....	48
4.6 รูปแบบการแสดงผลแบบ Image map โดยขนาดของรูอากาศในแต่ละวงแตกต่างกัน.....	48
4.7 รูปแบบการแสดงผลแบบ Height Plot โดยขนาดของรูอากาศในแต่ละวงแตกต่างกัน.....	49
4.8 กราฟแสดงค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสง เมื่อ $d=0.3 \mu\text{m}$	50
4.9 กราฟแสดงค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสง เมื่อ $d=0.5 \mu\text{m}$	51
4.10 กราฟแสดงค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสง เมื่อ $d_1,d_2,d_3=0.3 \mu\text{m}$ และ $d_4,d_5=0.5 \mu\text{m}$	52
4.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลทั้ง 3 อย่าง.....	53

รายการคำย่อ

อักษรย่อ	เต็มภาษาอังกฤษ	คำแปลภาษาไทย
CL	Confinement Loss	การสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสง
DFT	Discrete Fourier Transform	การแปลงฟูเรียร์แบบเต็มหน่วย
FDTD	Finite Difference Time Domain	วิธีผลต่างสี่บเนื่องจำกัดโดเมนเวลา
FFT	Fast Fourier Transform	การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว
FWHM	the Full Width at Half Maximum	ค่าครึ่งหนึ่งของแนวความกว้าง
Im	Imaginary Part	ค่าคงที่เชิงซ้อน
Phc	Photonic crystal	ผลึกโฟโตนิกส์
PMLs	Perfectly Method Layers	ชั้นที่ตรงกันอย่างสมบูรณ์
PWEM	Plane-Wave Expansion Method	วิธีขยายตัวของคลื่นระนาบ
TE	Transverse Electric	สนามไฟฟ้าวางตามขวาง
TM	Transverse Magnetic	สนามแม่เหล็กวางตามขวาง
μm	Micrometer	ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์

a	คือ	ระยะห่างระหว่างหลุม
a_1	คือ	เวกเตอร์ a_1
a_2	คือ	เวกเตอร์ a_2
c	คือ	ความเร็วแสง
D	คือ	ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าอิสระ
d	คือ	เส้นผ่าศูนย์กลาง
E	คือ	สนามไฟฟ้า
E_0	คือ	แอมพลิจูดของ E
E_x	คือ	สนามไฟฟ้าในแนวแกน x
E_y	คือ	สนามไฟฟ้าในแนวแกน y
E_z	คือ	สนามไฟฟ้าในแนวแกน z
f_{center}	คือ	ศูนย์กลางความถี่
G	คือ	เวกเตอร์ G
g_1	คือ	เวกเตอร์ g_1
g_2	คือ	เวกเตอร์ g_2
H	คือ	สนามแม่เหล็ก
H_0	คือ	แอมพลิจูดของ H
H_x	คือ	สนามแม่เหล็กในแนวแกน x
H_y	คือ	สนามแม่เหล็กในแนวแกน y
H_z	คือ	สนามแม่เหล็กในแนวแกน z
$Im(n_{eff})$	คือ	ส่วนจินตภาพของดัชนีหักเหประสิทธิผล
i,j,k	คือ	ตำแหน่งของแลตทิซในระบบ xyz
J	คือ	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
k	คือ	เวกเตอร์คลื่น
$k(G)$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ทางฟูรีเยร์ของเวกเตอร์แลตทิซส่วนกลับ G
l	คือ	จำนวนเต็ม
n	คือ	ค่าดัชนีหักเหของแสง
P	คือ	การกระจายกำลังภายนอก
Q	คือ	คุณภาพของแพกเตอร์
R	คือ	เวกเตอร์ R

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์(ต่อ)

r	คือ	รัศมีของหลุมอากาศ
Δf	คือ	ค่าครึ่งหนึ่งของแนวความกว้างของค่าเรโซแนนซ์สูงสุด
Δt	คือ	เวลาที่เพิ่มขึ้น
Δx	คือ	ระยะระหว่างตำแหน่งแลตทิซในทิศทาง x
Δy	คือ	ระยะระหว่างตำแหน่งแลตทิซในทิศทาง y
λ	คือ	ความยาวคลื่น
π	คือ	ค่าคงตัวทางคณิตศาสตร์
δ_{ij}	คือ	Kronecker delta
ω	คือ	ความถี่เชิงมุม
ϵ	คือ	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุ
ϵ_0	คือ	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกในสุญญากาศ
μ	คือ	ค่าซึมซาบทางแม่เหล็กของวัสดุ
μ_0	คือ	ค่าซึมซาบทางแม่เหล็กของสุญญากาศ
ρ	คือ	ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าอิสระ
σ	คือ	สภาพความนำกระแส
Λ	คือ	ระยะระหว่างหลุม

รายการคำศัพท์เทคนิค

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
การกระจายของแสง	Dispersion
การคูณภายใน	inner product
การแปลงฟูรีเยร์แบบเต็มหน่วย	Discrete Fourier Transform
การแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว	Fast Fourier Transform
การวิเคราะห์ความถี่เชิงซ้อน	Complex Frequency Analysis
การสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสง	Confinement loss
การหาค่าปริพันธ์ด้วยวิธีเชิงตัวเลข	numerical integration
เกณฑ์ความเสถียรของคุรันต์	Courant limit
ขนาดของช่วงเวลา	Time Step
คลื่นบล็อด	Bloch wave
ความเสถียรภาพ	Stability
โครมาติก	Chromatic
จุดบกพร่อง	defect
ชั้นที่ตรงกันอย่างสมบูรณ์	Perfectly Method Layers
พื้นที่บริลลูอิน	Brillouin zone
พริมิทีฟแลตทิซเวกเตอร์	primitive lattice vectors
ฟังก์ชันเบสเซล	Bessel function
ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน	Cartesian coordinate system
แลตทิซ	lattice
แลตทิซบราเวียส	Bravais lattice
แลตทิซส่วนกลับ	reciprocal lattice
วิธีการขยายตัวของคลื่นระนาบ	Plane-Wave Expansion Method
วิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลา	Finite Difference Time Domain
สัญญาณแสง	Optical signal
สนามไฟฟ้าวางตามขวาง	Transverse Electric
สนามแม่เหล็กวางตามขวาง	Transverse Magnetic
หนึ่งหน่วยเซลล์	Unit cell

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันเส้นใยแก้วนำแสง (Optical fiber) ได้มีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยส่งผลให้เทคโนโลยีการสื่อสารและการส่งสัญญาณมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น แต่ก็ยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับการสูญเสียของสัญญาณ และการกระจายของแสง (Dispersion)

เทคโนโลยีทางโฟโตนิกส์คริสตัล (Photonic crystal) เป็นความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมความถี่และการจำกัดทิศทางของแสง โดยโครงสร้างของโฟโตนิกส์คริสตัลไฟเบอร์ (Photonic crystal fiber) ประกอบไปด้วยรูอากาศจำนวนมากเรียงตัวกันแบบหกเหลี่ยมและวัสดุที่ใช้คือซิลิกาที่มีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1.46 ในปี 1996 โฟโตนิกส์คริสตัลไฟเบอร์ที่ใช้งานได้จริงเป็นครั้งแรกนั้นเป็นผลงานของโจนาธาน ไนท์ (Jonathan Knight), ทิม เบิร์ก (Tim Birks) และ ฟิลิป รัสเซลล์ (Philip Russell) ที่มหาวิทยาลัยเมืองบาร ซึ่งเทคโนโลยีทางโฟโตนิกส์คริสตัลได้มีการพัฒนาไปในด้านที่ดีขึ้น ทั้งด้านการวิจัยและด้านการสื่อสาร เนื่องจากโฟโตนิกส์คริสตัลไฟเบอร์มีคุณสมบัติที่ดีเยี่ยมทำให้การสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสง (Confinement loss) ในโฟโตนิกส์คริสตัลไฟเบอร์มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับไฟเบอร์แบบปกติ ถ้าแสงมีการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสงน้อยแสดงว่าเกิดการกระจายของแสงน้อย ซึ่งการกระจายของแสงคือการผิดเพี้ยน (Distortion) ของสัญญาณแสง (Optical signal) กล่าวคือเมื่อทำการป้อนแสงเข้าไปที่ปลายข้างหนึ่งของโวลีไฟเบอร์แสงที่ออกจากปลายอีกข้างจะมีความกว้างของพัลส์เพิ่มจากเดิม เมื่อความกว้างของพัลส์เพิ่มขึ้นจะเกิดการซ้อนทับกับพัลส์ข้างเคียงเกิดการแทรกสอดระหว่างกัน โดยการกระจายของแสงบางครั้งเรียกว่าโครมาติก (Cromatic)

เนื่องจากว่าที่ผ่านมาได้มีการศึกษาค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสงในโวลีไฟเบอร์ชนิดเรียงตัวแบบหกเหลี่ยมโดยทำการเปลี่ยนขนาดของรูอากาศซึ่งรูอากาศมีการจัดเรียงตัวทั้งหมด 4 ชั้นโดยค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสงมีค่าเท่ากับ -0.09 dB/m ที่ 1.55 ไมโครเมตร (μm) ซึ่งเป็นงานวิจัยของ SHWETA SABOO[1] ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาเกี่ยวกับค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสงในโวลีไฟเบอร์ชนิดเรียงตัวแบบหกเหลี่ยมโดยทำการเปลี่ยนขนาดของรูอากาศซึ่งรูอากาศมีการจัดเรียงทั้งหมด 5 ชั้น และทำการจำลองจากโปรแกรม OptiFDTD ซึ่งจะทำให้การพิจารณา TE ที่ความยาวคลื่น 1.55 ไมโครเมตร และทำการศึกษาคงสมบัติการกระจายของแสงและทำให้การกระจายของแสงมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งวัตถุประสงค์ในการศึกษาแบบจำลองนี้เพื่อวิเคราะห์ลักษณะของโวลีไฟเบอร์ให้ได้โวลีไฟเบอร์ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาความรู้ที่เกี่ยวกับผลึกโฟโตนิกส์และโฮลีย์ไฟเบอร์
- 1.2.2 เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ทางแสงในโฮลีย์ไฟเบอร์ โดยการใช้โปรแกรมจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Optiwave
- 1.2.3 เพื่อออกแบบลักษณะโครงสร้างที่มีการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสงในโฮลีย์ไฟเบอร์ให้มีค่าน้อยที่สุด
- 1.2.4 เพื่อศึกษาค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสงในโฮลีย์ไฟเบอร์ชนิดเรียงตัวแบบหกเหลี่ยมโดยที่รูของอากาศมีการจัดเรียงตัว 5 ชั้น ซึ่งจะทำให้การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสงที่โฮลีย์ไฟเบอร์ที่มีขนาดของรูของอากาศเท่ากันทุกชั้น กับโฮลีย์ไฟเบอร์ที่มีขนาดของรูของอากาศในแต่ละชั้นแตกต่างกัน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

การศึกษาสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาเชิงทฤษฎีที่เกี่ยวกับผลึกโฟโตนิกส์และโฮลีย์ไฟเบอร์ ซึ่งทำการใช้โปรแกรมจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ในการจำลองโฮลีย์ไฟเบอร์ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1.3.1 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูอากาศของโฮลีย์ไฟเบอร์ชนิดเรียงตัวแบบหกเหลี่ยมและออกแบบให้รูของอากาศมีทั้งหมด 5 ชั้น ที่ความยาวคลื่น $1.55 \mu\text{m}$ และทำการกำหนดระยะพิทที่ $0.85 \mu\text{m} - 2.40 \mu\text{m}$ และค่า r เท่ากับ $0.1 \mu\text{m} - 0.3 \mu\text{m}$ โดยการใช้โปรแกรม OptiFDTD ในการจำลองโฮลีย์ไฟเบอร์ จากนั้นทำการตรวจวัดค่า โปรแกรมจะแสดงผลค่าที่ได้ทางกราฟ ซึ่งกราฟที่ได้จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างส่วนจินตภาพ (Imaginary part) และความยาวคลื่น λ (μm)

1.3.2 ศึกษาการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสงในโฮลีย์ไฟเบอร์โดยทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีในการดำเนินงาน

1.4.1 แผนการดำเนินงาน สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

- | | |
|--------------|--|
| ขั้นตอนที่ 1 | เสนองานวิจัย |
| ขั้นตอนที่ 2 | ศึกษารายละเอียด ทฤษฎี และข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการงานวิจัย |
| ขั้นตอนที่ 3 | ศึกษาโครงสร้างและชนิดของโฮลีย์ไฟเบอร์ |
| ขั้นตอนที่ 4 | ศึกษาองค์ประกอบและตัวแปรเงื่อนไข |
| ขั้นตอนที่ 5 | สร้างแบบจำลองของโฮลีย์ไฟเบอร์ |
| ขั้นตอนที่ 6 | วิเคราะห์ผลการจำลอง |
| ขั้นตอนที่ 7 | สรุปผลการวิเคราะห์ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.2 ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการแต่ละขั้นตอน

เดือน ลำดับ	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
	ขั้นตอนที่ 1	■										
ขั้นตอนที่ 2	■	■	■									
ขั้นตอนที่ 3			■	■								
ขั้นตอนที่ 4				■	■	■						
ขั้นตอนที่ 5						■	■	■				
ขั้นตอนที่ 6								■	■	■		
ขั้นตอนที่ 7										■	■	■

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับผลึกโฟโตนิกส์และโฮลีย์ไฟเบอร์
- 1.5.2 มีความรู้ความเข้าใจในโปรแกรมจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Optiwave
- 1.5.3 สามารถออกแบบลักษณะโครงสร้างที่มีการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสงในโฮลีย์ไฟเบอร์ที่มีค่าน้อยที่สุด

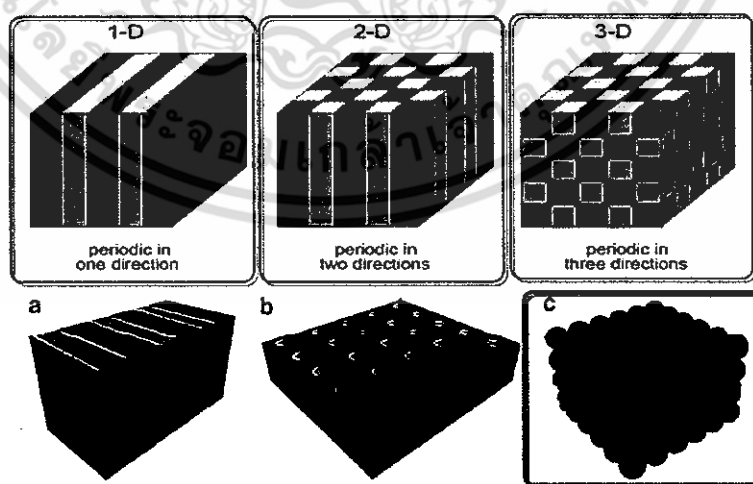
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับผลึกโฟโตนิกส์ [3]

ผลึกโฟโตนิกส์เป็นสิ่งประดิษฐ์ในกลุ่มของตัวกลางทางแสงที่ถูกนำเสนอโดยโครงสร้างที่ถูกรังสร้างโดยการเลียนแบบมาจากโครงสร้างของอะตอมขึ้นมา โดยใช้ค่าดัชนีหักเหที่มีความแตกต่างกันมาจัดเรียงต่อกันให้เป็นคาบ รูปแบบหน่วยเซลล์ที่ได้จึงมีความคล้ายคลึงกันกับโครงสร้างของอะตอมที่เคยจำแนกไว้ใน บราวเวียส์แลตทิซ ทำให้ตัวกลางทางแสงหรือผลึกโฟโตนิกส์ที่สร้างขึ้นมานี้มีคุณสมบัติความถี่ที่เฉพาะเจาะจง โดยขึ้นอยู่กับรูปแบบโครงสร้างและค่าดัชนีหักเหของสารไดอิเล็กทริกซ์ที่ใช้ ในการจำแนกประเภทของผลึกโฟโตนิกส์นั้น จะใช้การกำหนดตามทิศทางแนวแกนของความเป็นคาบด้วยดัชนีหักเหที่นำมาจัดเรียงต่อกันเท่านั้น ดังรูปที่ 2.1 รูปทางด้านบน (แถบสีแดงและสีเหลือง) แสดงให้เห็นถึงทิศทางความเป็นคาบในทิศทางตามแนวแกนต่างๆตามทฤษฎี (John D. Joannopoulos, 2008) และรูปทางด้านล่าง (แถบสีเขียวและดำ) แสดงลักษณะการจัดเรียงแบบคาบของดัชนีหักเหในทิศทางตามแนวแกนต่างๆที่สามารถสร้างขึ้นจริงได้ (Igor A. Sukhoivanov, 2009) โดยแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบด้วยกัน ดังนี้



รูปที่ 2.1 ประเภทของโครงสร้างผลึกโฟโตนิกส์ (John D. Joannopoulos, 2008) (Igor A. Sukhoivanov, 2009)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 ผลึกโฟโตนิกส์แบบ 1 มิติ

ในรูปแบบหนึ่งมิตินั้นจะสามารถแสดงให้เห็นได้ด้วยโครงสร้างที่ขึ้นแบบชั้นหรือแผ่นของค่าดัชนีหักเหที่แตกต่างกันนำมาวางเรียงต่อกัน ดังรูปที่ 2.2 แถบช่องว่างเชิงแสงที่ได้จะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดความหนาของชั้น ค่าดัชนีหักเหของสารไดอิเล็กทริกซ์และจำนวนของชั้นที่เรียงต่อกันอย่างต่อเนื่องในแบบคาบ

1-D



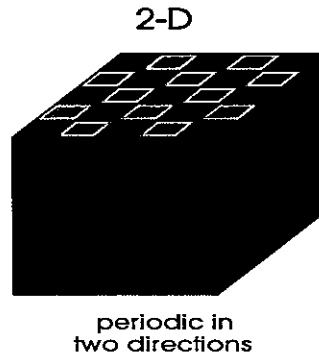
periodic in
one direction

รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกโฟโตนิกส์ในรูปแบบ 1 มิติ [11]

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าสารไดอิเล็กทริกที่นำมาจัดเรียงต่อกันในคาบในแบบหนึ่งมิติมีขนาดความหนาและค่าดัชนีหักเหของสารที่แตกต่างกัน พบว่าถ้าหากค่าดัชนีหักเหของสารมีความใกล้เคียงจะทำให้มีอัตราส่วนแถบช่องว่างเชิงแสงที่แคบมาก แต่ถ้าหากสารที่มีค่าดัชนีหักเหที่แตกต่างกันมาก อัตราส่วนแถบช่องว่างเชิงแสงที่ได้จะยิ่งกว้างมากขึ้นไปด้วย

2.1.2 ผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ

ในรูปแบบสองมิตินั้นจะแสดงให้เห็นได้ด้วยการแปรตามรูปร่างของหนึ่งหน่วยเซลล์ (Unit cell) จากโครงสร้างที่นำมาวางจัดเรียงด้วยค่าดัชนีหักเหที่แตกต่างกันแบบคาบพบว่ามีสองรูปแบบหลักที่น่าสนใจ ได้แก่ โครงสร้างที่จัดเรียงแบบสี่เหลี่ยม และโครงสร้างที่จัดเรียงแบบสามเหลี่ยม ดังรูปที่ 2.3



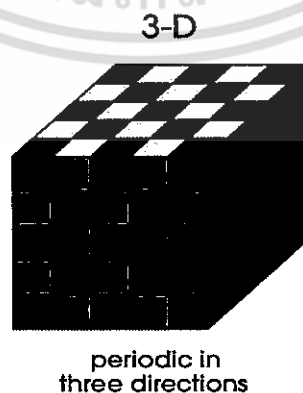
รูปที่ 2.3 โครงสร้างที่จัดเรียงแบบสามเหลี่ยมของผลึกโฟโตนิกส์ในรูปแบบ 2 มิติ [12]

จากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าสารไดอิเล็กตริกซ์ที่นำมาจัดเรียงต่อกันในแบบคาบสองมิตินี้ ในการพิจารณาอย่างง่าย นิยมพิจารณาด้วยการระบุค่าอัตราส่วนของตัวแปรโครงสร้างที่เป็นขนาดของรัศมีต่อระยะห่างระหว่างหลุม เท่ากับ r/a พบว่าโครงสร้างสามเหลี่ยมแบบหลุมอากาศ เกิดแถบช่องว่างเชิงแสงได้ทั้งแบบโหมดสนามแม่เหล็กและแบบโหมดสนามไฟฟ้า

2.1.3 ผลึกโฟโตนิกส์แบบ 3 มิติ

ในรูปแบบสามมิตินั้นจะแสดงให้เห็นโครงสร้างของแลตทิซ ชนิดต่างๆ ไว้หลากหลายรูปแบบ เพราะระบบผลึกโฟโตนิกส์แบบสามมิตินั้นมีความคล้ายคลึงกันกับโครงสร้างของอะตอมที่มีอยู่ในธรรมชาติมากที่สุด โดยเฉพาะจากการศึกษาพบว่าโครงสร้างแบบเพชรนั้นเป็นโครงสร้างที่มีแถบช่องว่างเชิงแสงแบบสมบูรณ์และมีความกว้างของแถบช่องว่างเชิงแสงมากที่สุด จึงทำให้เกิดการศึกษาผลึกโฟโตนิกส์ที่สร้างเลียนแบบโครงสร้างของอะตอมในแบบเพชรกันอย่างกว้างขวางมาก ดังรูปที่

2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกโฟโตนิกส์ในรูปแบบ 3 มิติ [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 2.4 จะเห็นสารไดอิเล็กตริกซ์ที่นำมาจัดเรียงต่อกันในแบบคาบสามมิตินี้เป็นการเลียนแบบโครงสร้างเพชรโดยใช้รูปร่างต่างๆ เพื่อให้เกิดความกว้างของแถบช่องว่างเชิงแสงมากที่สุด และเป็นโครงสร้างสามมิติที่สามารถสร้างขึ้นจริงได้ง่ายกว่ารูปร่างลูกทรงกลมที่อยู่ทางด้านซ้ายสุด

2.2 คลื่นระนาบแบบ 2 มิติ

ผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ เป็นระยะของแนวแกนที่มี 2 ทิศทาง และในรูปแบบ 3 ทิศทาง ตัวอย่างของผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ จะแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งประกอบไปด้วยการจัดเรียงตัวขนานกันของแท่งในทิศแนวแกน x และ y และมีลักษณะเหมือนกันที่ทิศแนวแกน z เมื่อทำการขยายไปเรื่อยๆ

โดยทั่วไปโครงสร้างของผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ เป็นการกำหนดให้ผ่านแลตทิซเวกเตอร์ R ที่สร้างขึ้นโดยปริมิทีฟแลตทิซเวกเตอร์ (primitive lattice vectors) a_1 และ a_2

$$R = ma_1 + na_2 \quad (2.1)$$

เมื่อ m และ n คือเลขจำนวนเต็ม ซึ่งมีการทดแทนทุกคู่จำนวนเต็มที่เป็นไปได้ตามสมการที่ (2.1) โดยทำการสร้างแลตทิซบราเวียสที่ประกอบไปด้วยจุดที่กระจายตลอดแนวระยะระนาบในจำนวนอนันต์ นอกจากนี้แลตทิซของเวกเตอร์ R ยังเรียกว่าพลิมิทิวแลตทิซ ซึ่งแลตทิซส่วนกลับ (reciprocal lattice) สามารถเขียนในรูปแบบเวกเตอร์ G ได้ว่า

$$e^{iG \cdot R} = 1 \quad (2.2)$$

จากสมการที่ (2.1) ยังสามารถเขียนได้เป็น

$$G \cdot R = 2\pi l \quad (2.3)$$

เมื่อ l คือเลขจำนวนเต็ม และแลตทิซส่วนกลับของเวกเตอร์ G สามารถเขียนในรูปของเวกเตอร์ g_1, g_2

$$G = m'g_1 + n'g_2 \quad (2.4)$$

เมื่อ m', n' คือจำนวนเต็ม และ g_1, g_2 คือส่วนกลับของพลิมิทิวแลตทิซเวกเตอร์ ซึ่งพิจารณาโดย

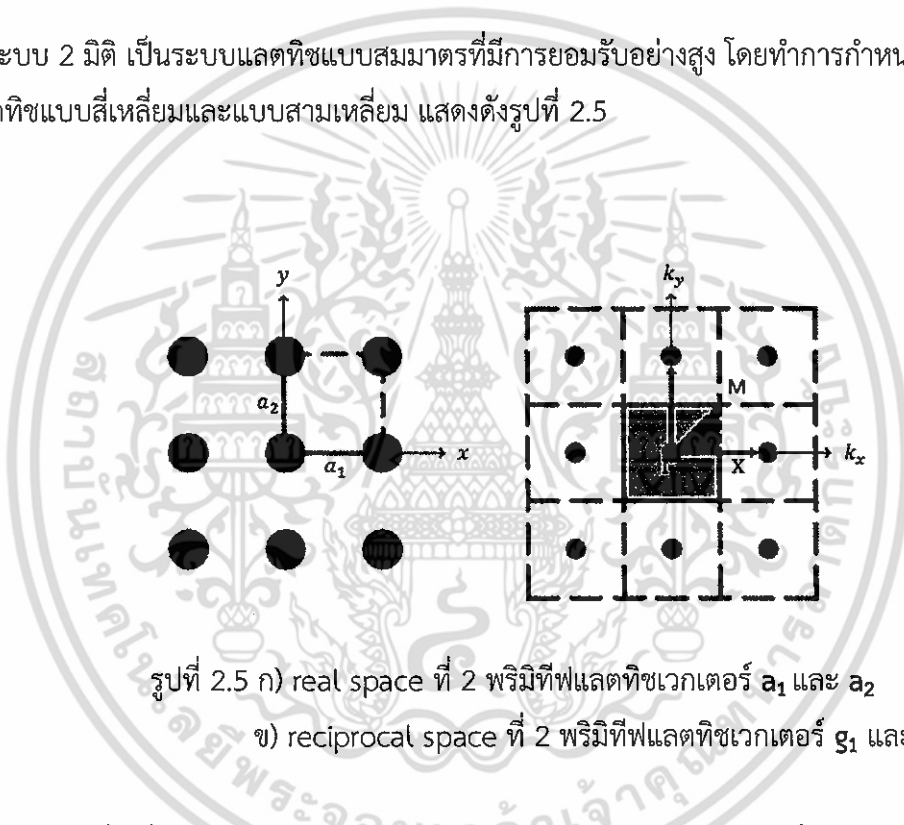
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathbf{a}_i \cdot \mathbf{g}_j = 2\pi\delta_{ij} \quad (2.5)$$

เมื่อ δ_{ij} คือสัญลักษณ์ Kronecker delta โดยกำหนดให้

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (2.6)$$

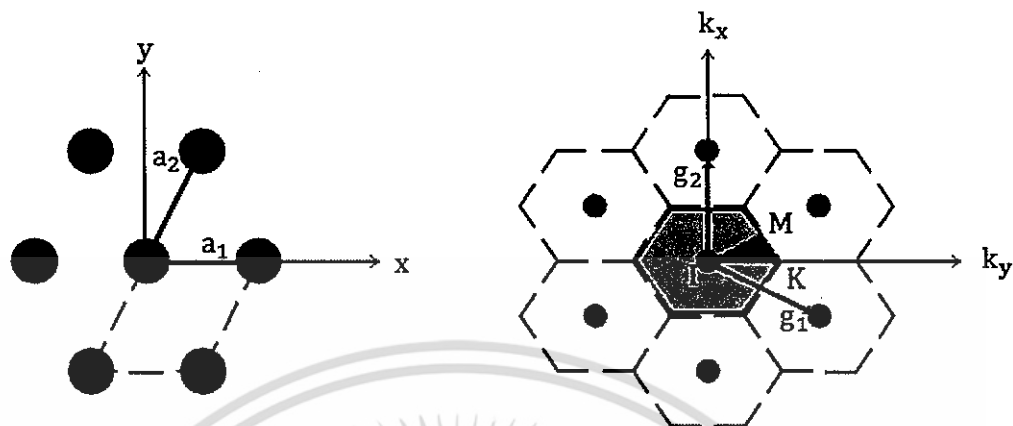
ในระบบ 2 มิติ เป็นระบบแลตทิซแบบสมมาตรที่มีการยอมรับอย่างสูง โดยทำการกำหนดค่าที่มีอยู่ที่แลตทิซแบบสี่เหลี่ยมและแบบสามเหลี่ยม แสดงดังรูปที่ 2.5



แลตทิซแบบสี่เหลี่ยมสามารถนำมาเขียนได้เป็น $\mathbf{a}_1 = a\hat{x}$ และ $\mathbf{a}_2 = a\hat{y}$ เมื่อ a คือค่าคงที่ของแลตทิซหน่วยเซลล์ของโครงสร้างแบบเป็นคาบซึ่งเป็นบริเวณปิดล้อมสี่เหลี่ยมใช้สมการที่ (2.5) เวกเตอร์ของแลตทิซส่วนกลับ หากจาก $\mathbf{g}_1 = (2\pi/a)\hat{x}$ และ $\mathbf{g}_2 = (2\pi/a)\hat{y}$ ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.5 ข) ใน reciprocal space ที่พื้นที่ Brillouin (Brillouin zone) ถูกสร้างเป็นโครงร่างโดยเส้นทึบในรูปที่ 2.5 ข) เนื่องจากแลตทิซสมมาตรแบบสี่เหลี่ยม สามารถทำการคำนวณแถบโครงสร้างภายในได้ 1/8 ของพื้นที่ Brillouin zone ที่ประกอบไปด้วยบริเวณสามเหลี่ยม $\Delta\Gamma XM$ ซึ่งมีสี่เหลี่ยมในรูปที่ 2.5 ข) ทุกจุดในพื้นที่ Brillouin zone ทั้งหมด คือจุดภายใน irreducible zone โดยตัวดำเนินการที่สมมาตรประกอบไปด้วยการหมุนที่ 90 องศา และการสะท้อน ที่เวกเตอร์คลื่นของมุม(จุด)ที่ irreducible zone โดยมี Γ , X และ M ที่ $\Gamma = 0$, $x = (\pi/a)\hat{x}$ และ $M = (\pi/a)(\hat{x} + \hat{y})$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับแลตทิซแบบ 3 เหลี่ยม ทางเลือกที่เหมาะสมของ 2 พลิมีทิฟแลตทิซเวกเตอร์ คือ $\mathbf{a}_1 = a\hat{x}$ และ $\mathbf{a}_2 = (a/2)(\hat{x} + \sqrt{3}\hat{y})$ เมื่อ a คือคาบของแลตทิซ ที่แสดงดังรูปที่ 2.6 ก)



รูปที่ 2.6 แลตทิซแบบสามเหลี่ยม ก) จัดเรียงแบบ real space กับ 2 พลิมีทิฟแลตทิซเวกเตอร์ \mathbf{a}_1 และ \mathbf{a}_2

ข) reciprocal wave vector space กับ พลิมีทิฟแลตทิซเวกเตอร์ \mathbf{g}_1 และ \mathbf{g}_2

เมื่อพื้นที่ Brillouin คือโครงสร้างที่เป็นเส้นทึบและเป็นสีเทา และเส้นสีเข้มแบบสามเหลี่ยมคือ $\Delta\Gamma\text{MK}$ ที่เป็น irreducible 1/12 ของพื้นที่ Brillouin

หนึ่งหน่วยเซลล์คือบริเวณปิดล้อมแบบรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน จากสมการที่ (2.5) โดยส่วนกลับของ พลิมีทิฟแลตทิซเวกเตอร์คือ $\mathbf{g}_1 = (2\pi/a)(\hat{x} - \hat{y}/\sqrt{3})$ และ $\mathbf{g}_2 = (4\pi/\sqrt{3}a)\hat{y}$ ซึ่งแสดงดังรูป 2.6 ข) เนื่องจากแลตทิซแบบสมมาตรสามารถทำการคำนวณแถบโครงสร้างภายในได้ 1/12 ของพื้นที่ Brillouin เมื่อบริเวณรูปสามเหลี่ยม $\Delta\Gamma\text{MK}$ ที่ลากสีเทาเข้มไว้ตามรูปที่ 2.6 เวกเตอร์คลื่นคือ $\Gamma = 0$, $M = (\pi/a)(\hat{x} + \hat{y}/\sqrt{3})$ และ $K = (4\pi/\sqrt{3}a)\hat{x}$

แม้ว่าแลตทิซแบบสี่เหลี่ยมและแบบสามเหลี่ยมได้ทำการอธิบายนอกเหนือจากที่แสดงตัวอย่างของ โครงสร้างโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ โดยตั้งข้อสังเกตในแบบทั่วไป ซึ่งแลตทิซบราเวียส (Bravais lattice) ใน 2 มิติ สร้างโดย 2 เวกเตอร์ คือ \mathbf{a}_1 และ \mathbf{a}_2

ถ้าฟังก์ชันไดอิเล็กตริก (dielectric function) $\epsilon(\mathbf{r})$ มีความสัมพันธ์ $\epsilon(\mathbf{r} + \mathbf{R}) = \epsilon(\mathbf{r})$ สำหรับ \mathbf{R} ในแลตทิซส่วนกลับและอื่นๆ $\epsilon_r(\mathbf{r})$ คือคาบใน 2 มิติ ที่มีส่วนกลับของฟังก์ชันไดอิเล็กตริกเป็น $\epsilon^{-1}(\mathbf{r} + \mathbf{R}) = \epsilon^{-1}(\mathbf{r})$ เพราะฉะนั้นสามารถแสดงในรูปของฟูเรียร์ได้

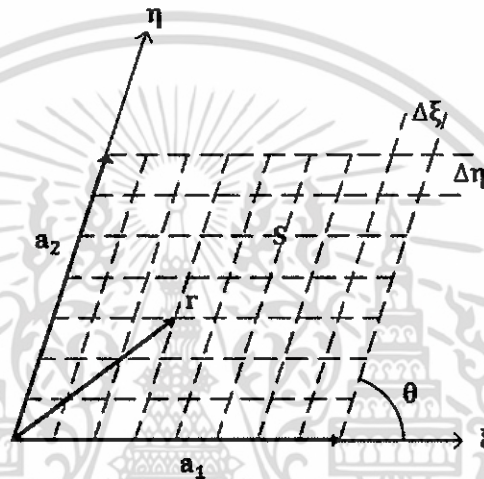
$$\epsilon^{-1}(\mathbf{r}) = \sum_{\mathbf{g}'} k(\mathbf{G}') e^{i(\mathbf{G}' \cdot \mathbf{r})} \quad (2.7)$$

เมื่อ $k(\mathbf{G})$ คือค่าสัมประสิทธิ์ทางฟูเรียร์ของเวกเตอร์แลตทิซส่วนกลับ \mathbf{G} เขียนโดย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\kappa(\mathbf{G}) = \frac{1}{s} \int_s \epsilon_r^{-1}(\mathbf{r}) e^{-j\mathbf{G}\cdot\mathbf{r}} ds \quad (2.8)$$

เมื่อ s คือปริมาตรของหน่วยเซลล์

สำหรับรูปแบบที่กำหนดของค่าไดอิเล็กตริกภายในหน่วยเซลล์ ซึ่งการหาค่าปริพันธ์ด้วยวิธีเชิงตัวเลข (numerical integration) จำเป็นต้องใช้ค่าสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ $\kappa(\mathbf{G})$ ในสมการที่ (2.8) แทนโดยการประมาณในรูปแบบผลรวมที่ไม่ต่อเนื่องแน่นอน ซึ่งหน่วยเซลล์สามารถแบ่งออกเป็น $N_1 \times N_2$ เป็นเซลล์เล็กๆ ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แผนภาพเมซของหน่วยเซลล์สำหรับการหาปริพันธ์ด้วยวิธีเชิงตัวเลขในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ ซึ่งปริมาตรของหน่วยเซลล์ (primitive lattice vectors) คือ $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2$ ที่หน่วยเซลล์มีการแบ่งออกเป็น $N_1 \times N_2$ ที่มีขนาดเล็กมากมายในระบบพิกัดแบบเอียง

เมื่อเวกเตอร์ 2 เวกเตอร์ของปริมาตรของหน่วยเซลล์ \mathbf{a}_1 และ \mathbf{a}_2 มีการกำหนดระบบพิกัดแบบเอียงกับมุม θ ที่หนึ่งเซลล์เล็กๆจะเพิ่มขึ้นแบบ $\Delta\xi = a_1/N_1$ และ $\Delta\eta = a_2/N_2$ ใน ξ และ η มีการระบุทิศทางกับสัญลักษณ์เลขจำนวนเต็ม $n_1 = 1, 2, \dots, N_1$ และ $n_2 = 1, 2, \dots, N_2$ ผลที่ตามมาคือตำแหน่งเวกเตอร์ในระบบพิกัดแบบเอียงสามารถเขียนในสมการที่ (2.9)

$$\mathbf{r} = \xi \frac{\mathbf{a}_1}{a_1} + \eta \frac{\mathbf{a}_2}{a_2} = n_1 \Delta\xi \frac{\mathbf{a}_1}{a_1} + n_2 \Delta\eta \frac{\mathbf{a}_2}{a_2} \quad (2.9)$$

ที่ $\mathbf{G} = m_1 \mathbf{g}_1 + m_2 \mathbf{g}_2$ นำสมการที่ (2.9) แทนลงใน (2.8) จะได้

$$\kappa(m_1, m_2) = \frac{1}{s} \int_0^{a_1} \int_0^{a_2} \frac{1}{\epsilon_r(\xi, \eta)} e^{-j[m_1 \mathbf{g}_1 + m_2 \mathbf{g}_2] \cdot [\xi \frac{\mathbf{a}_1}{a_1} + \eta \frac{\mathbf{a}_2}{a_2}]} \sin \theta \, d\xi d\eta$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\cong \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{n_1} \sum_{n_2} \frac{1}{\epsilon_r(n_1, n_2)} e^{-j2\pi \left[\frac{m_1 n_1}{N_1} + \frac{m_2 n_2}{N_2} \right]} \quad (2.10)$$

ในขั้นตอนสุดท้ายเลขจำนวนเต็มคือการประมาณผลรวมที่ไม่ต่อเนื่องของค่าสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์สามารถใช้ FFT กับการคำนวณที่ซับซ้อนของ $O(N \log N)$ ได้ เมื่อ $N = N_1 N_2$ คือผลรวมของคลื่นระนาบ

สำหรับแท่งทรงกลมจะมีรัศมี r และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็น ϵ_a ที่ยังอยู่ในพื้นผนังวัสดุกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ϵ_b ค่าสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์สามารถคำนวณและวิเคราะห์ได้

$$\kappa(\mathbf{G}) = \begin{cases} \frac{1}{\epsilon_a} f + \frac{1}{\epsilon_b} (1 - f) & |\mathbf{G}| = 0 \\ \left[\frac{1}{\epsilon_a} - \frac{1}{\epsilon_b} \right] f \frac{J_1(|\mathbf{G}|R)}{|\mathbf{G}|R}, & |\mathbf{G}| \neq 0, \end{cases} \quad (2.11)$$

เมื่อ $f = \pi r^2 / (a^2 \sin \theta)$ คือแฟกเตอร์ทั้งหมดและ $J_1(x)$ คือฟังก์ชันเบสเซล (Bessel function) อันดับที่ 1 ของสนามในแนวแกน z ควรจะเป็นศูนย์ ผลที่ตามมาคือสมการแมกซ์เวลล์ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinate system) ดังสมการที่ (2.12)

$$\begin{cases} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = j\omega \epsilon_0 \epsilon_r E_x \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = j\omega \epsilon_0 \epsilon_r E_y \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega \epsilon_0 \epsilon_r E_z \end{cases} \begin{cases} \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} = j\omega \mu_0 H_x \\ \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} = j\omega \mu_0 H_y \\ \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} = j\omega \mu_0 H_z \end{cases} \quad (2.12)$$

ทำการลดรูปของสมการ

$$\begin{cases} \frac{\partial H_z}{\partial y} = j\omega \epsilon_0 \epsilon_r E_x \\ -\frac{\partial H_z}{\partial x} = j\omega \epsilon_0 \epsilon_r E_y \\ \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} = j\omega \mu_0 H_z \end{cases} \begin{cases} -\frac{\partial E_z}{\partial y} = j\omega \mu_0 H_x \\ \frac{\partial E_z}{\partial x} = j\omega \mu_0 H_y \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega \epsilon_0 \epsilon_r E_z \end{cases} \quad (2.13)$$

ในส่วนแรกของสมการจะมีส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวภายในแกน xy ซึ่งสามารถอธิบายสิ่งที่เราเรียกว่า โหมด TE หรือคลื่นโพลาไรซ์ TE ส่วนพจน์ที่สองของสมการมีเพียงสนามแม่เหล็กเพียงอย่างเดียวภายในแกน xy ซึ่งสามารถอธิบายสิ่งที่เรียกว่า โหมด TM หรือคลื่นโพลาไรซ์ TM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการตัดส่วนประกอบของสนามไฟฟ้า E_x และ E_y ออกไปจากพจน์แรกของสมการ จะได้สมการคลื่นของสนามแม่เหล็ก H_z สำหรับโหมด TE

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\epsilon(\mathbf{r})} \frac{\partial}{\partial x} H_z(\mathbf{r}) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\epsilon(\mathbf{r})} \frac{\partial}{\partial y} H_z(\mathbf{r}) \right) + \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 H_z(\mathbf{r}) = 0 \quad (2.14)$$

ทำการใช้ขั้นตอนเดียวกัน โดยตัดส่วนประกอบของสนามแม่เหล็ก H_x และ H_y จากพจน์ที่สองของสมการที่ได้จากสมการคลื่น สำหรับส่วนประกอบของสนามไฟฟ้า E_z ของโหมด TM จะได้สมการ

$$\frac{1}{\epsilon(\mathbf{r})} \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right] E_z(\mathbf{r}) + \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 E_z(\mathbf{r}) = 0 \quad (2.15)$$

ในส่วนตัวไป จะทำการวิเคราะห์และแก้ปัญหาของสนามสำหรับแต่ละจำพวกของโหมดไอเกน กล่าวคือ TE และ TM โพรพาไรซ์ จะกล่าวแยกกัน

2.2.1 TE โพรพาไรซ์เซชัน

คลื่น TE โพรพาไรซ์คือคลื่นที่สนามไฟฟ้าโพรพาไรซ์ในแกน xy เป็นคลื่นที่มีเพียง E_x , E_y และ H_z โดยสนามเป็นส่วนที่ไม่ได้หายไป ซึ่งในตัวกลางจะมีสนาม H ที่สามารถจำแนกในคลื่นบล็อด (Bloch wave) คลื่นระนาบ แอมพลิจูดกับคาบของฟังก์ชัน

$$H_z(\mathbf{r}) = u(\mathbf{k}, \mathbf{r}) e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \quad (2.16)$$

เมื่อฟังก์ชัน $u(\mathbf{k}, \mathbf{r})$ ของแลตทิซ $u(\mathbf{k}, \mathbf{r} + \mathbf{R}) = u(\mathbf{k}, \mathbf{r})$ และทำการขยายสมการโดยใช้อนุกรมฟูเรียร์

$$u(\mathbf{k}, \mathbf{r}) = \sum_{\mathbf{G}} h(\mathbf{k}, \mathbf{G}) e^{i(\mathbf{G} \cdot \mathbf{r})} \quad (2.17)$$

นำไปสู่

$$H_z(\mathbf{r}) = \sum_{\mathbf{G}} h(\mathbf{k}, \mathbf{G}) e^{i(\mathbf{k} + \mathbf{G}) \cdot \mathbf{r}} \quad (2.18)$$

เมื่อ $\mathbf{k} = k_x \hat{x} + k_y \hat{y}$ คือเวกเตอร์คลื่น 2 มิติ

ทำการแทนสนามและขยาย $\frac{1}{\epsilon_r(\mathbf{r})}$ จากสมการ (2.18) และ (2.7) ตามลำดับ โดยเทอมแรกของสมการคลื่น (2.14)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\epsilon_r} \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\sum_{\mathbf{G}'} \kappa(\mathbf{G}') e^{j\mathbf{G}' \cdot \mathbf{r}} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \sum_{\mathbf{G}} h(\mathbf{k}, \mathbf{G}) e^{j(\mathbf{k}+\mathbf{G}) \cdot \mathbf{r}} \right] \\ &= - \sum_{\mathbf{G}'', \mathbf{G}} (\kappa_x + \mathbf{G}_x) \kappa(\mathbf{k}_x + \mathbf{G}_x) \kappa(\mathbf{G}'' - \mathbf{G}) h(\mathbf{k}, \mathbf{G}) e^{j(\mathbf{k}+\mathbf{G}') \cdot \mathbf{r}} \end{aligned} \quad (2.19)$$

เมื่อ $\mathbf{G}'' = \mathbf{G} + \mathbf{G}'$ ซึ่งในเทอมที่สองสามารถเขียนได้คล้ายกัน

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\epsilon_r} \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) &= \frac{\partial}{\partial y} \left[\sum_{\mathbf{G}'} \kappa(\mathbf{G}') e^{j\mathbf{G}' \cdot \mathbf{r}} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \sum_{\mathbf{G}} h(\mathbf{k}, \mathbf{G}) e^{j(\mathbf{k}+\mathbf{G}') \cdot \mathbf{r}} \right] \\ &= - \sum_{\mathbf{G}'', \mathbf{G}} (\kappa_y + \mathbf{G}_y) \kappa(\mathbf{k}_y + \mathbf{G}_y) \kappa(\mathbf{G}'' - \mathbf{G}) h(\mathbf{k}, \mathbf{G}) e^{j(\mathbf{k}+\mathbf{G}') \cdot \mathbf{r}} \end{aligned} \quad (2.20)$$

ทำการรวมสมการทั้ง 2 เทอมเข้าด้วยกัน ซึ่งสามารถเขียนสมการคลื่นได้ว่า

$$\begin{aligned} \sum_{\mathbf{G}'', \mathbf{G}} (\mathbf{k} + \mathbf{G}) \cdot (\mathbf{k} + \mathbf{G}'') \kappa(\mathbf{G}'' - \mathbf{G}) h(\mathbf{k}, \mathbf{G}) e^{j(\mathbf{k}+\mathbf{G}'') \cdot \mathbf{r}} \\ = \frac{\omega^2}{c^2} \sum_{\mathbf{G}} h(\mathbf{k}, \mathbf{G}) e^{j(\mathbf{k}+\mathbf{G}) \cdot \mathbf{r}} \end{aligned} \quad (2.21)$$

นำคลื่นระนาบ $\exp(j\mathbf{G}' \cdot \mathbf{r})$ แทนลงไปยังสมการที่ (2.21) ทั้ง 2 ด้านของสมการ

$$\begin{aligned} \sum_{\mathbf{G}'', \mathbf{G}} (\mathbf{k} + \mathbf{G}) \cdot (\mathbf{k} + \mathbf{G}'') \kappa(\mathbf{G}'' - \mathbf{G}) h(\mathbf{k}, \mathbf{G}) \int e^{j(\mathbf{G}'' - \mathbf{G}') \cdot \mathbf{r}} d\mathbf{s} \\ = \frac{\omega^2}{c^2} \sum_{\mathbf{G}} h(\mathbf{k}, \mathbf{G}) \int e^{j(\mathbf{G} - \mathbf{G}') \cdot \mathbf{r}} d\mathbf{s} \end{aligned} \quad (2.22)$$

การอินทิเกรตหน่วยเซลล์สามารถวิเคราะห์สมการได้

$$\int_{\mathbf{s}} e^{j(\mathbf{G}'' + \mathbf{G}') \cdot \mathbf{r}} d\mathbf{s} = \begin{cases} \mathbf{s} & , \mathbf{G}'' = \mathbf{G}' \\ 0 & , \mathbf{G}'' \neq \mathbf{G}' \end{cases} \quad (2.23)$$

นำไปสู่ eigenvalue

$$\sum_{\mathbf{G}} (\mathbf{k} + \mathbf{G}) \cdot (\mathbf{k} + \mathbf{G}') \kappa(\mathbf{G}' - \mathbf{G}) h(\mathbf{k}, \mathbf{G}) = \frac{\omega^2}{c^2} h(\mathbf{k}, \mathbf{G}') \quad (2.24)$$

หรือในรูปของเมตริก

$$\mathbf{A}h = \lambda h \quad (2.25)$$

เมื่อ eigenvalues คือ $\lambda = \omega^2/c^2$
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 TM โพรราไรซ์เซชัน

TM โพรราไรซ์ เป็นคลื่นที่มีส่วนประกอบของสนามแม่เหล็กที่โพรราไรซ์ในแกน xy ซึ่งเป็นคลื่นที่มีเพียง H_x , H_y และ H_z เป็นส่วนประกอบ โดยสนามไฟฟ้าสามารถเขียนได้เป็น

$$E_z(\mathbf{r}) = \sum_{\mathbf{G}} \eta(\mathbf{k}, \mathbf{G}) e^{j(\mathbf{k}+\mathbf{G})\cdot\mathbf{r}} \quad (2.26)$$

นำส่วนกลับของพหุนามจากสมการที่ (2.7) และสนามไฟฟ้าจากสมการที่ (2.26) แทนลงในสมการ (2.15) จะได้

$$\begin{aligned} \sum_{\mathbf{G}'} \kappa(\mathbf{G}') \cdot e^{j(\mathbf{G}'\cdot\mathbf{r})} \sum_{\mathbf{G}} \left[(k_x - G_x)^2 + (k_y - G_y)^2 \right] \eta(\mathbf{k}, \mathbf{G}) e^{j(\mathbf{k}+\mathbf{G})\cdot\mathbf{r}} \\ = \frac{\omega^2}{c^2} \sum_{\mathbf{G}} \eta(\mathbf{k}, \mathbf{G}) e^{j(\mathbf{k}+\mathbf{G})\cdot\mathbf{r}} \end{aligned} \quad (2.27)$$

ทำการจัดรูปสมการให้ย้ายขึ้นโดยแทน \mathbf{G}'' เป็น $\mathbf{G} + \mathbf{G}'$ จะได้

$$\sum_{\mathbf{G}'', \mathbf{G}} \kappa(\mathbf{G}'' - \mathbf{G})(\mathbf{k} + \mathbf{G})^2 \eta(\mathbf{k}, \mathbf{G}) e^{j(\mathbf{k}+\mathbf{G}'')\cdot\mathbf{r}} = \frac{\omega^2}{c^2} \sum_{\mathbf{G}''} \eta(\mathbf{k}, \mathbf{G}'') e^{j(\mathbf{k}+\mathbf{G}'')\cdot\mathbf{r}} \quad (2.28)$$

นำสมการที่ได้มาทำการคูณภายใน (inner product) และใช้สมการที่ (2.23)

$$\sum_{\mathbf{G}} \kappa(\mathbf{G}' - \mathbf{G})(\mathbf{k} + \mathbf{G})^2 \eta(\mathbf{k}, \mathbf{G}) = \frac{\omega^2}{c^2} \eta(\mathbf{k}, \mathbf{G}') \quad (2.29)$$

ซึ่งจะเขียนในรูปแบบสมการ eigenvalue ถึงแม้ว่าในเมตริกจะไม่สมมาตร แต่เมื่อแทนในสมการที่ (2.28) จะได้

$$b(\mathbf{k}, \mathbf{G}) = |\mathbf{k} + \mathbf{G}| \eta(\mathbf{k}, \mathbf{G}) \quad (2.30)$$

จะได้ผลของค่า eigenvalue สำหรับเมตริก โดยทำการคูณทั้ง 2 ข้างของสมการที่ (2.29)

$$\sum_{\mathbf{G}} |\mathbf{k} + \mathbf{G}'| \kappa(\mathbf{G}' - \mathbf{G})(\mathbf{k} + \mathbf{G})^2 \eta(\mathbf{k}, \mathbf{G}) = \frac{\omega^2}{c^2} |\mathbf{k} + \mathbf{G}'| \eta(\mathbf{k}, \mathbf{G}') \quad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งทำการใช้สมการที่ (2.30) แทนใน $\eta(\mathbf{k}, \mathbf{G})$ โดยทำการจัดรูปใหม่ได้

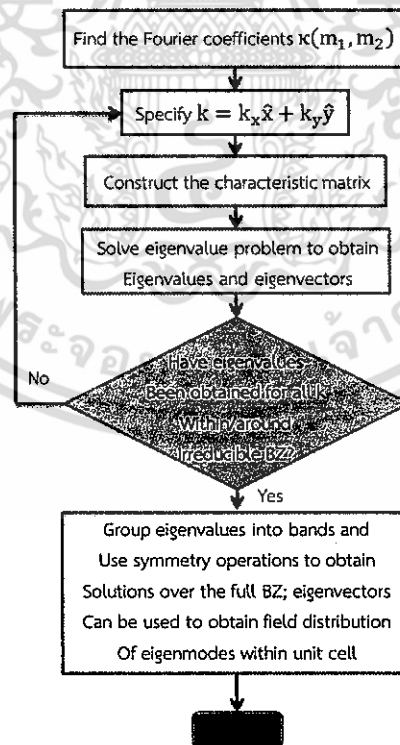
$$\sum_{\mathbf{G}} |\mathbf{k} + \mathbf{G}'| \kappa(\mathbf{G}' - \mathbf{G}) |\mathbf{k} + \mathbf{G}| b(\mathbf{k}, \mathbf{G}) = \frac{\omega^2}{c^2} b(\mathbf{k}, \mathbf{G}') \quad (2.32)$$

สามารถนำผลมาเขียนในรูปเมตริกได้

$$\mathbf{A}\mathbf{b} = \lambda\mathbf{b} \quad (2.33)$$

เมื่อ eigenvalue คือ $\lambda = \omega^2/c^2$

ทั้งสมการที่ (2.24) และ (2.32) ผลรวมของแลตทิซส่วนกลับคือทำการลดรูปสมการเพื่อได้ผลเฉลยเชิงตัวเลขของ eigenvalue จากสมการที่ (2.24) และ (2.32) ทำการแก้สมการจะได้ค่า eigenvalue ของทั้ง 2 (ω^2/c^2) และจะได้ค่าไอเกนเวกเตอร์ $h(\mathbf{k}, \mathbf{G})$ หรือ $b(\mathbf{k}, \mathbf{G})$ ตามลำดับ ทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีลักษณะที่เหมือนกันคือจะได้ eigenfrequency $\omega(\mathbf{k})$ ซึ่งสามารถนำมาคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (2.18) หรือ (2.26) และ (2.30) ตามลำดับ จากนั้นทำการแก้สมการที่ (2.24) หรือ (2.32) จากพจน์ของเวกเตอร์คลื่น $\{\mathbf{k}\}$ ที่ช่วงพื้นที่ irreducible Brillouin ในการกระจาย eigenmodes ที่มาจากผลึกโฟโตนิกส์



รูปที่ 2.8 ผังงาน (flowchart) สำหรับการคำนวณของแถบโครงสร้างผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ โดยใช้

วิธีการขยายคลื่นระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนผัง ในรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นถึงขั้นตอนที่ได้กล่าวข้างต้น เมื่อทำการสรุปก่อนที่จะเริ่มทำการคำนวณแถบโครงสร้างโดยทำการคำนวณสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ ซึ่งในการวิเคราะห์จะใช้ FFT โดยทำการกำหนดเวกเตอร์คลื่นในพื้นที่ irreducible Brillouin ซึ่งเมตริก A จะมีทั้ง TE และ TM โหมด จากนั้นทำการแก้สมการ eigenvalue โดยขั้นตอนวิธีเมตริก ที่อนุกรมของ eigenfrequencies ที่ไม่ต่อเนื่อง $\omega(\mathbf{k})$ และ eigenvectors โดยทำซ้ำตามขั้นตอนขั้นต้น ซึ่ง eigenmodes จะได้พจน์ของเวกเตอร์คลื่นภายในพื้นที่ irreducible Brillouin โดยโหมดเหล่านี้คือการแจกแจงจากความถี่ต่ำถึงความถี่สูง เมื่อตัวเลขในที่นี้คือแถบดัชนี และทำการแก้สมการกับดัชนี $n, \omega_n(\mathbf{k})$ เรียกว่า แถบ nth ซึ่งที่ผ่านมาเรามีแถบโครงสร้างภายในพื้นที่ irreducible Brillouin ส่วนที่เหลือของพื้นที่ Brillouin จะได้ตัวดำเนินการที่สมมาตร และการกระจายของพื้นผิว ซึ่งแสดงค่า eigenfrequencies ฟังก์ชันของเวกเตอร์คลื่นสำหรับแต่ละแถบจะมีการเชื่อมต่อจุดที่ใกล้ที่สุดใน $\omega - \mathbf{k}$ space ภายในแต่ละแถบ กระบวนการนี้ใช้สำหรับแลตทิซแบบสี่เหลี่ยมกับแท่งไดอิเล็กทริกในอากาศ แสดงดังรูป 2.9



รูปที่ 2.9 ผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ เป็นแลตทิซแบบสี่เหลี่ยมของแท่งไดอิเล็กทริกในอากาศ

2.3 การเกิดความบกพร่องแบบจุด (Point defect)

การสะท้อนในรูจะเกิดความบกพร่องแบบจุดในผลึกโฟโตนิกส์ ความบกพร่องจะเกิดจากการปรับเปลี่ยนรูปทรง ขนาด หรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของคุณลักษณะ Phc โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ จำนวนโหมดในโพรงและสามารถทำการปรับความถี่เรโซแนนซ์ภายในรูได้ ซึ่งพิจารณาได้จากตัวอย่างแลตทิซรูปสี่เหลี่ยมของแท่งทรงกระบอกที่มีการเปรียบเทียบไดอิเล็กทริกที่สูงพอสมควรระหว่างโฮสต์และแท่งวัสดุ ใน Phc จุดบกพร่องสามารถเกิดจากการเปลี่ยนแปลงเพียง 1 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

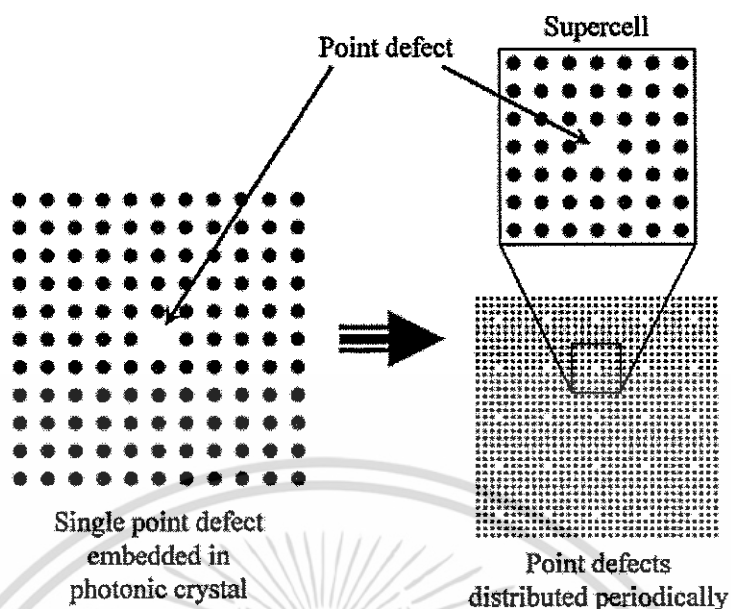
พารามิเตอร์ของแท่งเดี่ยวภายในผลึก ยกตัวอย่างเช่นการลดรัศมีของแท่งไดอิเล็กทริกส่งผลให้เกิดจุดบกพร่องที่รองรับโหมดเดี่ยวเฉพาะ อีกทางเลือกหนึ่งถ้าเราทำการเพิ่มรัศมีของแท่ง เป็นโหมดผสมที่อยู่ภายในแท่งเฉพาะ ความถี่เรโซแนนซ์เกิดที่แท่งดังกล่าว ซึ่งจะถูกกำหนดโดยรัศมีของแท่งมีการเปลี่ยนแปลง

เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางแสงของรู เช่น เทคนิคตัวเลขต่างๆที่นำมาใช้ ทั้ง 2 เทคนิคได้พบว่าเป็นประโยชน์อย่างยิ่งกับวิธีการขยายตัวของคลื่นระนาบ (PWEM) ซึ่งทำงานที่โดเมนความถี่และวิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลา (FDTD) ซึ่งแสดงถึงการแก้ระบบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในโดเมนเวลา เราจะทำการวิเคราะห์ข้อบกพร่องในผลึกโฟโตนิกส์

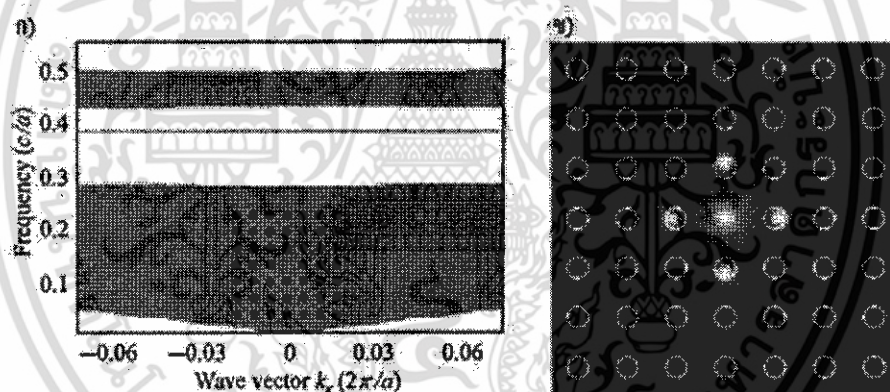
2.3.1 การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของความบกพร่องแบบจุด

ในหัวข้อที่ 2.2 ได้ทำการแก้ปัญหาของค่าไอเกนมาตรฐานที่ได้มาจากสมการคลื่น ซึ่งได้จากสมการแมกซ์เวลล์ของผลึกโฟโตนิกส์ 1, 2 และ 3 มิติ เช่นเดียวกับแผ่นผลึกโฟโตนิกส์ วิธีการแก้ปัญหาค่าไอเกนจะให้คุณสมบัติการกระจายตัวของผลึกโฟโตนิกส์ จะพบว่าการเพิ่มประสิทธิภาพแลตทิซ ขนาด เพิ่มปัจจัย หรือดัชนีหักเห สามารถกำหนดทิศทางของช่องว่างรอบๆได้

ในส่วนี้เราจะกล่าวถึงความบกพร่องแบบจุดในแลตทิซโดยทำให้เกิดการรบกวนเฉพาะที่ช่วงของผลึกโฟโตนิกส์และเราทำการคำนวณเฉพาะโหมดภายในบริเวณความบกพร่องแบบจุด ซึ่งการประยุกต์ใช้ PWEM ดังกล่าวจะเกิดคาบที่ทุกทิศทาง อย่างไรก็ตามในผลึกโฟโตนิกส์จะมีความบกพร่องแบบจุดเดี่ยวตรงบริเวณพื้นที่จำกัด และช่วยในการแบ่งคาบ ซึ่งทำให้ไม่สามารถใช้ PWEM ได้ แต่เพื่อแก้สมการนี้อนุญาตให้มีการใช้ PWEM ได้โดยจะเหมือนกันกับความบกพร่องเป็นคาบที่มีการกระจายทั่วทั้งผลึกโฟโตนิกส์ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.10 ความบกพร่องของโหมดจะถูกกักขังอย่างดีภายในหลุม มันสามารถแยกจากความบกพร่องที่ใกล้เคียงกันโดยจะมีจำนวนชั้น PhC อยู่รอบๆ เพราะสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของความบกพร่องของโหมดสูญสลายไปอย่างรวดเร็วในขณะที่แยกความบกพร่องออกไปทิศทางใดก็ได้ ซึ่งหลุมสามารถพิจารณาแยกจากกันได้ โดยแต่ละตัวจะทำตัวเหมือนช่องเดี่ยวภายในผลึกโฟโตนิกส์ การวิเคราะห์ที่โครงสร้างโดยใช้ PWEM ซุปเปอร์เซลล์ (supercell) ที่อยู่ในรูปที่ 2.10 จะประกอบไปด้วยคาบหลายคาบของผลึกโฟโตนิกส์ที่ตั้งอยู่รอบๆความบกพร่องแบบจุดในกึ่งกลางของพื้นที่สี่เหลี่ยม ซุปเปอร์เซลล์ถือว่าเป็นหน่วยเซลล์ใน PWEM ซึ่งทำซ้ำเป็นระยะๆ ในทุกทิศทางและถือว่าเป็นคาบเดี่ยวของแลตทิซใหม่ พื้นฐานของคาบนี้ สามารถคำนวณโครงสร้างได้โดยการตรวจสอบพวกโครงสร้าง และอาจพบว่าข้อบกพร่องของโหมดมีความถี่ภายในช่องว่างและที่ความถี่เรโซแนนซ์ไม่ขึ้นอยู่กับเวกเตอร์คลื่น



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของซูเปอร์เซลล์ที่ความบกพร่องแบบจุดซึ่งวิเคราะห์โดยใช้ PWEM [6]



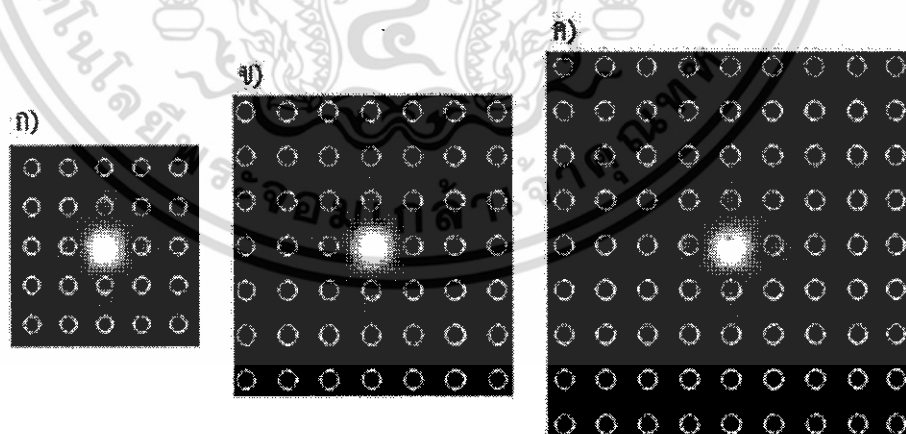
รูปที่ 2.11 การวิเคราะห์ซูเปอร์เซลล์ของความบกพร่องแบบจุด ก) แผนภาพการกระจายตัว ข) การกระจายสนามไฟฟ้าของเวกเตอร์คลื่น $(0.4\hat{x} + 0.3\hat{y})2\pi/a$ [6]

ยกตัวอย่างเช่นการพิจารณาความบกพร่องแบบจุดในซูเปอร์เซลล์แบบ 2 มิติที่ประกอบไปด้วยการจัดเรียงแบบสี่เหลี่ยม 7×7 ของแท่งไดอิเล็กตริกที่แท่งตรงกลางหายไป แท่งไดอิเล็กตริกที่อยู่ในอากาศมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็น 12.25 และมีทรงกลมตัดขวางที่รัศมี $0.2a$ เมื่อ a คือค่าคงที่ของแลตทิซ พื้นผิวการกระจายของแถบที่แตกต่างกันในกรณีนี้การโพลาไรซ์ของสนามแม่เหล็กวางตามขวาง (TM) จะแสดงในรูปที่ 2.11 ก) บนระนาบ ωk_x เราทำการแก้สมการไอเกนที่เกี่ยวข้องสำหรับเวกเตอร์คลื่นภายใน first Brillouin zone (เรียกว่าหน่วยเซลล์เป็นซูเปอร์เซลล์ $7a \times 7a$ และด้วยเหตุนี้ first Brillouin zone จะมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับค่าคงที่ของแลตทิซ) ในรูปนี้จะสังเกตเห็นการกระจายตัวของพื้นผิวระนาบที่ปรากฏภายในช่องว่างโฟโตนิกส์และที่ความถี่ไอเกนที่ไม่ขึ้นอยู่กับโหมดที่สอดคล้องกันของเวกเตอร์คลื่น k เมื่อเพิ่มเติมโหมดเหล่านี้ผลลัพธ์ของความบกพร่องไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นผลึกโฟโตนิกส์ ซึ่งทำให้รู้ว่าผลึกเหล่านี้มีความบกพร่องของโหนดกลายเป็นแถบของความถี่ เช่นเดียวกันกับการแพร่ของโหนดของความบกพร่องอิสระโดย PhC จัดว่าอยู่กลุ่มวิธีนี้ แต่ละแถบของความบกพร่องของโหนดมักจะถูกเรียกว่าเป็นเพียงหนึ่งในความบกพร่องของโหนด ความถี่เรโซแนนซ์ของโหนดควิตี้ภายในช่องว่าง $0.383c/a$ บริเวณเงาในรูป 2.11 ก) ที่แสดงแถบสลับอย่าง ต่อเนื่อง เรา รู้จักกับโหนดควิตี้ไปแล้ว การกระจายของสนามสามารถสังเกตได้จากความสัมพันธ์ที่ใช้ คำนวณโอเคนเวกเตอร์ PWEM ดังรูปที่ 2.13 ข) ซึ่งแสดงการกระจายแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า สำหรับการเลือกเวกเตอร์คลื่นที่ $(0.4x + 0.3y)2\pi/a$ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกกักขังอย่างดีภายในควิตี้ และความเข้มลดลงอย่างรวดเร็วในทุกทิศทาง ในทำนองเดียวกันการกักขังความบกพร่องของ โหนดสังเกตได้ที่เวกเตอร์คลื่นอื่นๆ

เพื่อศึกษาผลกระทบที่จำนวนชั้นของผลึกโฟโตนิกส์ที่อยู่รอบๆความบกพร่องแบบจุดบน คุณสมบัติการสั่นของโหนด พิจารณาการวิเคราะห์ควิตี้ของผลึกโฟโตนิกส์ได้ที่รูป 2.10 และ 2.11 เพื่อตรวจสอบข้อมูลเพิ่มเติมที่ไม่สามารถหาได้โดยวิธีการ PWEM คุณภาพดังกล่าวของแพ็คเกจจะ ใช้วิธีการ FDTD โดยชั้นที่ตรงกันอย่างสมบูรณ์ (PMLs) ที่ลดการสะท้อนกลับ ซึ่งจะจำลองด้วยการ เปิดรอบๆแบบโล่ง ซึ่งจะถูกใช้สำหรับการคำนวณขอบเขตพื้นที่

โหนดทุกโหนดจะถูกกระตุ้นโดยการวางแหล่งกำเนิดขั้วไว้ที่หลายๆจุดที่เสมือนทำการสุ่ม ตำแหน่งภายในบริเวณความบกพร่องและจะปล่อยพัลส์ที่ระยะสั้นๆที่ครอบคลุมแบนด์วิดท์ เมื่อวาง เครื่องตรวจจับแบบหลากหลายในควิตี้ที่ตรวจจับจะเกิดการตอบสนองชั่วคราว โหนดการสั่นจะระบุ จุดสูงสุดที่ตอบสนองความถี่ที่ได้รับโดยการดำเนินการอนุกรมฟูเรียร์



รูปที่ 2.12 แอมพลิจูดของสนามที่โหนดควิตี้ของผลึกโฟโตนิกส์กับจำนวนชั้นกักกันที่ผลึกโฟ โตนิกส์ ก) ชั้น 2 $Q=148$ ข) ชั้น 3 $Q=461$ ค) ชั้น 4 $Q=1636$ [6]

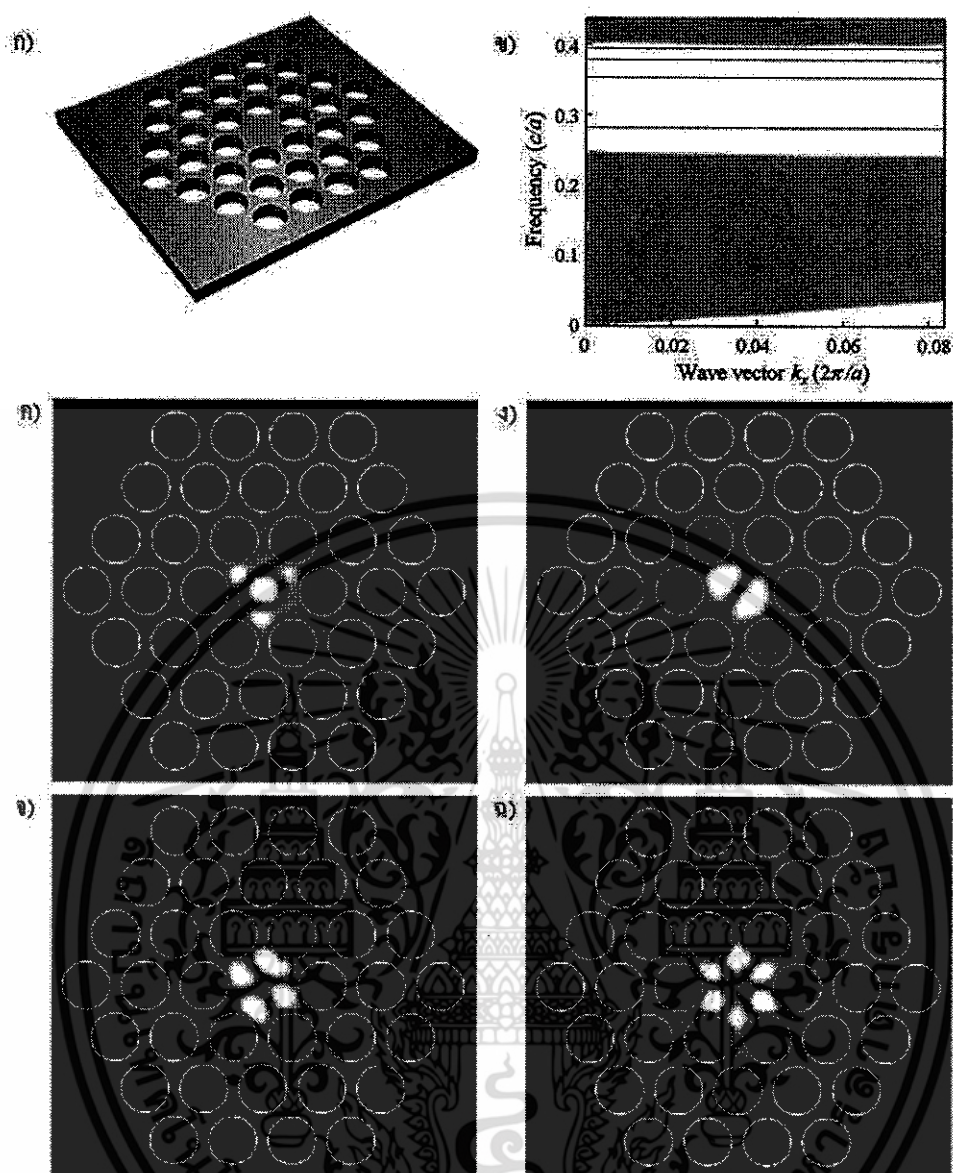
เพื่อคว่ำขันการกักกันส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติการสั้นของโหมด จากนั้นพิจารณาโครงสร้างที่เหมือนกันในรูปที่ 2.10 กับแท่งไดอิเล็กตริกที่หายไป ที่รูป 2.12 แสดงโหมดควาวิตี้ของจำนวนรอบชั้นผลึกโฟโตนิกส์เพิ่มขึ้นจาก 2 ไป 4 เช่นเดียวกันก่อนที่จะระบบจะถูกวิเคราะห์โดยการใช้ PWEM สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะสูญสลายไปอย่างรวดเร็วในขณะที่มันเข้ามาในผลึกโฟโตนิกส์ที่รอบๆความบกพร่อง ซึ่งเป็นผลมาจากความถี่เรโซแนนซ์ถูกเจอในตัวกลางของความกว้างของช่องว่างโฟโตนิกส์ ซึ่งเหมือนว่าน้อยที่สุดเท่ากับสองชั้นของผลึกโฟโตนิกส์มีโหมดการสั้นที่กักกันเพียงพอ (รูป 2.12 ก)) อย่างไรก็ตามการประเมินด้วยสายตาเหล่านี้ของโหมดสามารถผิดพลาดได้ ในความเป็นจริงคุณภาพของแพกเตอร์ Q เปลี่ยนแปลงจำนวนชั้นรอบๆที่เพิ่มขึ้นจาก 148 ถึง 461 ถึง 1636 สำหรับ 2, 3 และ 4 ชั้นที่อยู่รอบๆ ตามลำดับ จะบ่งชี้ว่าเป็นจำนวนแยกชั้นที่น้อย ซึ่งพลังงานรั่วไหลออกมาจากควาวิตี้

อีกวิธีจะกล่าวถึงความบกพร่องแบบจุดอย่างง่ายในผลึกโฟโตนิกส์โดยเพิ่มวัสดุไดอิเล็กตริกแทนการเอาออก ซึ่งเทคนิคนี้ทำให้เกิดความบกพร่องชนิดของตัวรับความบกพร่อง ยกตัวอย่างเช่น การพิจารณาแลตทิซรูปสามเหลี่ยมของของรูทรงกลมในสแลบซิลิกอนกับค่าดัชนีหักเหที่ 3.5 ที่รูของอากาศมีรัศมี $0.4a$ เมื่อ a คือค่าคงที่ของแลตทิซ แลตทิซ PhC นี้เป็นความกว้างของแถบช่องว่างที่การโพไรไรซ์สนามไฟฟ้าวางตามขวาง (TE) ซึ่งความบกพร่องจะอยู่ที่รูของอากาศในจุดกึ่งกลางของการจัดเรียงตัวแบบหกเหลี่ยมของผลึกโฟโตนิกส์ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ก) PWEM ใช้เทคนิคซูเปอร์เซลล์โดยจะได้แผนภาพการกระจายตัวที่แสดงในรูป 2.13 ข) ซึ่งใน 4 โหมดของควาวิตี้ถูกแยกความถี่เป็น $0.3832c/a$, $0.3681c/a$, $0.3453c/a$ และ $0.2748c/a$ จากนั้นทำการใช้การจำลอง FDTD เพื่อตรวจสอบรายละเอียดของโหมดที่สอดคล้องกับความถี่เรโซแนนซ์เหล่านี้ โดยที่ 4 โหมดของควาวิตี้จะแสดงในรูป 2.13 ค) ที่ f มีการระบุว่าเป็นโมโนโพล (monopole) ไดโพล (dipole) ควอดรูโพล (quadrupole) และโหมดเฮกซ่าโพล (hexapole) ตามลำดับ คุณภาพของแพกเตอร์ที่เกี่ยวข้องคือ 633, 660, 1736 และ 739 ตามลำดับ

ความสามารถที่จะได้รับ Q สูงในปริมาณน้อยของความบกพร่องแบบจุดโดยใช้เพียงวัสดุไดอิเล็กตริกซึ่งเป็นคุณสมบัติที่โดดเด่นของผลึกโฟโตนิกส์ที่ควาวิตี้

2.3.2 เกณฑ์การออกแบบสำหรับควาวิตี้ของผลึกโฟโตนิกส์

ในส่วนก่อนหน้าเราได้กล่าวถึงวิธีที่แตกต่างที่ความบกพร่องแบบจุดภายในโครงสร้างผลึกโฟโตนิกส์ ซึ่งที่ความบกพร่องแบบจุดเหล่านี้ดักจับโหมดแม่เหล็กไฟฟ้าและด้วยเหตุนี้จึงเกิดรูทางแสงประสิทธิภาพในการดักจับแสงของรูทางแสงจะมีคุณภาพของแพกเตอร์ Q ซึ่งจะมีการวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ภายในรูและสามารถถูกกำหนดได้โดยใช้สมการดังนี้



รูปที่ 2.13 ก) ความบกพร่องแบบจุดที่ประกอบไปด้วยรูอากาศที่หายไปไนซิลิกาสแลบ ข) ความสัมพันธ์การกระจายของ PWEM ที่ใช้เทคนิคซูเปอร์เซลล์ ค) โหมดโมนโพล (0.3681c/a) ง) โหมดไดโพล (0.2748c/a) จ) โหมดควอดรูโพล (0.3453c/a) และ ฉ) โหมดเฮกซ่าโพล (0.3832c/a) [6]

$$Q = \frac{\omega E}{P} \quad (2.34)$$

เมื่อ E คือพลังงานที่เก็บไว้ภายในรู, ω คือความถี่เรโซแนนซ์ และ $P = -dE/dt$ คือการกระจายกำลังภายนอก รู กล่าวอีกนัยหนึ่งคือคุณภาพแฟกเตอร์ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ 2π ที่ผกผันกับแฟกเตอร์ที่สูญเสียพลังงานในคาบเดียวของการสั่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า คุณภาพของแฟกเตอร์ที่รู้มีบทบาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำคัญในการออกแบบที่ได้ความหนาแน่นสูงที่ความยาวคลื่นของฟิลเตอร์และระบบมัลติเพล็กซ์ โดยค่า Q สูงจะแปลว่าช่องจะมากขึ้นเมื่อถูกมัลติเพล็กซ์ สังเกตเห็นได้ว่าเราจะพิจารณาการคำนวณ Q

$$Q = \frac{f_{center}}{\Delta f} \quad (2.35)$$

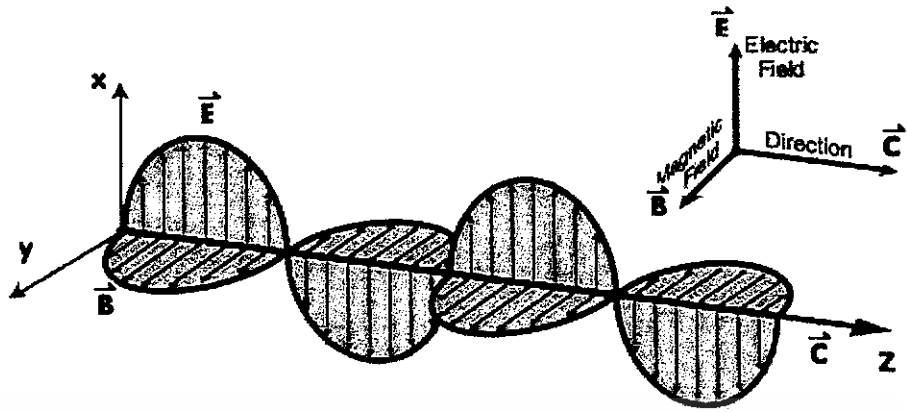
เมื่อ f_{center} คือศูนย์กลางความถี่ และ Δf คือค่าครึ่งหนึ่งของแนวความกว้าง (FWHM) ของค่าเรโซแนนซ์สูงสุด ดังนั้น Q สูงจะสอดคล้องกับความกว้างของสเปกตรัมแคบที่ค่าสูงสุดของการเรโซแนนซ์

ในผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ คุณภาพของแพ็คเกจอร์ส่วนใหญ่จะเป็นฟังก์ชันของจำนวนความบกพร่องของชั้นที่อยู่รอบๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความกว้างของสเปกตรัมที่ความบกพร่องของโหมดลดลงอย่างรวดเร็วพร้อมกับจำนวนชั้นของแลตทิซที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นที่ต้องการในระบบมัลติเพล็กซ์ที่ความเข้มสูงเพราะจะช่วยในการเลือกค่าแบนด์วิดท์ที่มีอยู่ได้มากขึ้น โดยรูขนาดไมโครที่มีค่า Q สูงจะสามารถรู้ได้ในสแลบของผลึกโฟโตนิกส์ใน 2 มิติ ถ้าแสงกระเจิงในทิศทางแนวตั้งและเมื่อแสงออกจากสแลบจะมีค่าลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นโดยการใช้การจำลอง FDTD ที่ทำการกำหนดไมโครควิตี้ทางแสงในท่อนำคลื่นของสแลบ 3 ชั้น และกระจกผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ ที่แสดงแพ็คเกจอร์ Q ที่ขึ้นอยู่กับความถี่ของหลุมโดยกำหนดผลึกโฟโตนิกส์และดัชนีหักเหของวัสดุที่อยู่รอบๆ แกนกลางของท่อนำคลื่น

2.4 การเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแสง [3]

การเดินทางของคลื่นแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ คลื่นตามยาวและคลื่นตามขวาง โดยคลื่นตามยาวจะมีทิศทางของการเดินทางอยู่ในทิศทางเดียวกันกับทิศทางของการสั่นของแสง และคลื่นตามขวางจะมีทิศทางอยู่ในทิศตั้งฉากกับทิศทางของการสั่นของแสง

เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางแสงของรู เช่น เทคนิคตัวเลขต่างๆที่นำมาใช้ ทั้ง 2 เทคนิคได้พบว่าเป็นประโยชน์อย่างยิ่งกับวิธีการขยายตัวของคลื่นระนาบ (PWEM) ซึ่งทำงานที่โดเมนความถี่และวิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลา (FDTD) ซึ่งแสดงถึงการแก้ระบบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในโดเมนเวลา เราจะทำการวิเคราะห์ข้อบกพร่องในผลึกโฟโตนิกส์



รูปที่ 2.14 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [9]

ดังนั้น แสงจึงเป็นคลื่นตามขวางและเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง เพราะว่าแสงเป็นคลื่นที่ประกอบไปด้วย สนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก H ดังรูป จะเห็นว่าทั้ง E และ H มีค่าการเปลี่ยนแปลงแบบคลื่นไซน์และสั้นในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของการเดินทางของแสงตามแนวแกน Z

นอกจากนี้ เวกเตอร์ E จะตั้งฉากซึ่งกันและกันกับเวกเตอร์ H เรียกคลื่นชนิดนี้ว่า คลื่นระนาบ (Plan wave)

จากรูปที่ 2.14 เมื่อแสงคลื่นที่ไปในทิศทางตามแนวแกน z และมีทิศทางของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x เมื่อ f เป็นความถี่ของคลื่นแสง λ เป็นความยาวคลื่นแสง E_0 เป็นแอมพลิจูดสูงสุด โดยมีค่าความถี่เชิงมุมเท่ากับ $\omega = 2\pi f$ และมีค่าเวกเตอร์เลขคลื่นที่ได้คือ $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ โดยมีผลเฉลยของสมการคลื่นทั้งของ E และ H ดังสมการ

$$E = E_0 \exp[-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})] \quad (2.36)$$

$$H = H_0 \exp[-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})] \quad (2.37)$$

โดยที่ E_0 คือ แอมพลิจูดของ E

H_0 คือ แอมพลิจูดของ H

ω คือ ความถี่เชิงมุม

\mathbf{r} คือ เวกเตอร์ระยะทาง

\mathbf{k} คือ เวกเตอร์เลขคลื่น

2.4.1 สมการคลื่น

หากพิจารณาลูกคลื่นใดๆซึ่งมีลักษณะตามสมการ $y' = f(x')$ ดังรูปที่ 2.15(ก) ลูกคลื่นนี้หยุดนิ่งในระบบพิกัด $O'(x', y')$ ต่อมาถ้าให้ระบบพิกัดนี้เคลื่อนที่ไปพร้อมกับลูกคลื่น $y' = f(x')$ ตามแนวราบทางขวา ด้วยอัตราเร็วคงที่ v เทียบกับระบบพิกัด $O(x, y)$ ดังรูปที่ 2.17(ข) ในขณะที่เคลื่อนที่ไป สมมติให้ลูกคลื่นมีลักษณะคงเดิม จุดใดๆบนลูกคลื่นเช่นจุด P จะเขียนได้ในระบบพิกัด O และ O' ในระบบพิกัดทั้งสองนี้ ตำแหน่งของจุด P จะเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned}x' &= x - vt \\y' &= y\end{aligned}$$



รูปที่ 2.15 (ก) แสดงลูกคลื่นที่หยุดนิ่ง และ (ข) ลูกคลื่นที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงที่

ถ้าทำการเทียบระหว่างพิกัด O จะได้สมการลูกคลื่นที่เคลื่อนที่ที่มีรูปเป็น

$$y = y' = f(x') = f(x - vt) \quad (2.38)$$

หากทำการพิจารณาสมการจะได้

$$\begin{aligned}\text{ซึ่ง} \quad & y = f(x') \\ & x' = (x \pm vt) \\ \text{จะได้ว่า}\end{aligned}$$

$$\frac{\partial x'}{\partial x} = 1 \text{ และ } \frac{\partial x'}{\partial t} = \pm v$$

ทำการใช้กฎลูกโซ่ (Chain rule) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial y}{\partial x} &= \frac{\partial f}{\partial x'} \frac{\partial x'}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial x'} \\ \frac{\partial y}{\partial t} &= \frac{\partial f}{\partial x'} \frac{\partial x'}{\partial t} = \pm v \frac{\partial f}{\partial x'} \end{aligned}$$

และถ้าทำการหาอนุพันธ์ลำดับที่สอง (second derivative) จะได้

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right) = \frac{\partial \left(\frac{\partial y}{\partial x'} \right) \partial x'}{\partial x'} \frac{\partial x'}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x'} \left(\frac{\partial f}{\partial x'} \right) = \frac{\partial^2 f}{\partial x'^2}$$

และ

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right) = \frac{\partial \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right) \partial x'}{\partial x'} \frac{\partial x'}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x'} \left(\pm v \frac{\partial f}{\partial x'} \right) (\pm v) = v^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x'^2}$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของอนุพันธ์ลำดับที่สองทั้งสองจะพบว่า

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f}{\partial x'^2} &= v^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x'^2} \\ \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 f}{\partial x'^2} \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (2.39)$$

สมการ (2.7) เรียกว่าสมการคลื่น (wave equation)

2.5 สมการแมกซ์เวลล์ [3]

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง สามารถอธิบายได้โดยใช้สมการแมกซ์เวลล์ ซึ่งได้ถูกนำเสนอไว้โดยแมกซ์เวลล์ในเรื่องคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสรุปเป็นทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ในปี ค.ศ. 1864 โดยมีสมการทั่วไปในรูปอนุพันธ์ย่อย 4 สมการหลัก

$$\nabla \cdot \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \rho \quad (2.40)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = 0 \quad (2.41)$$

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.42)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.43)$$

โดยที่ \mathbf{E} คือ สนามไฟฟ้า

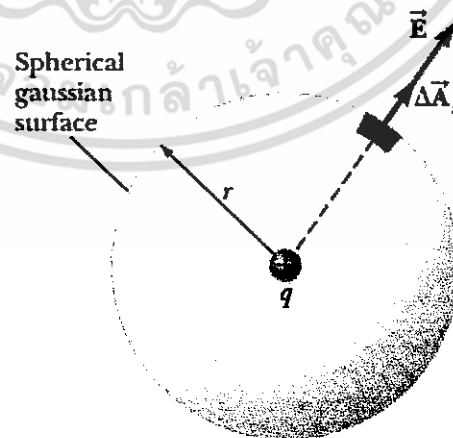
\mathbf{H} คือ สนามแม่เหล็ก

\mathbf{D} คือ ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า

ρ คือ ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าอิสระ

\mathbf{J} คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

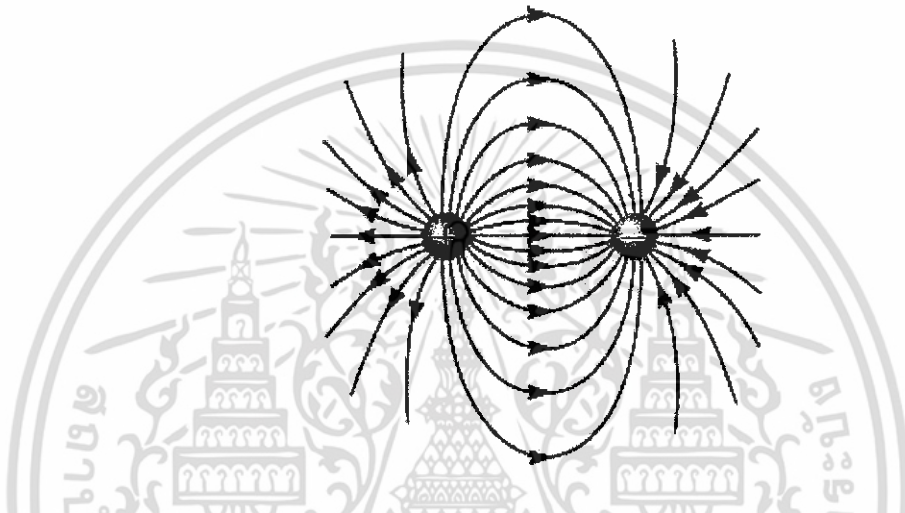
จากกฎของเกาส์สำหรับสนามไฟฟ้าทำให้เราทราบว่าฟลักซ์ของสนามไฟฟ้าที่ผ่านพื้นที่ผิวปิดใดๆ จะมีค่าคงที่เสมอโดยไม่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของพื้นที่ผิวปิด แต่จะขึ้นกับความหนาแน่นประจุภายในผิวปิดเท่านั้น



รูปที่ 2.16 กฎของเกาส์สำหรับสนามไฟฟ้า [10]

ถ้าพิจารณาในตัวแปรของความเข้มสนามไฟฟ้าจะได้ว่าผลรวมของความเข้มสนามไฟฟ้าในพื้นที่ปิดจะเป็นอัตราส่วนระหว่างผลรวมของประจุไฟฟ้ากับค่าเพอร์มิติวิตีของวัตถุ ค่า ϵ คือค่าเพอร์มิติวิตี (Permittivity) ของวัตถุซึ่งจะเป็นตัวบ่งบอกถึงความเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีผลต่อวัตถุนั้นๆ โดยเขียนในรูปสมการได้ตามสมการที่ (2.40)

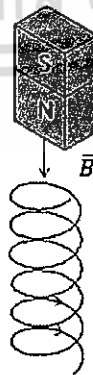
จากกฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็กทำให้ทราบว่าเส้นแรงแม่เหล็กของสนามแม่เหล็กที่พื้นที่ผิวปิดใดๆจะมีค่าเป็นศูนย์เสมอ เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กพุ่งเข้าผิวปิดจึงมีค่าเท่ากับเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งออกจากผิวปิด จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านผิวปิดใดๆจึงมีค่าเป็นศูนย์ ดังสมการที่ (2.41)



รูปที่ 2.17 กฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็ก [10]

สมการ (2.41) แสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างสนามแม่เหล็กและไฟฟ้า เราไม่สามารถพบขั้วแม่เหล็กอิสระ (แม่เหล็กมีขั้วเหนือหรือขั้วใต้เพียงอย่างเดียว) เหมือนกับที่ได้พบประจุอิสระ

จากกฎของฟาราเดย์ เมื่อสนามแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้าหมุนวนรอบสนามแม่เหล็ก เช่น ในขดลวดโซลินอยด์



รูปที่ 2.18 ขดลวดโซลินอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำแท่งเหล็กวิ่งเข้าหาขดลวด สนามแม่เหล็กบริเวณขดลวดจะเพิ่มขึ้น (เปลี่ยนแปลงตามเวลา) ก็จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าหมุนวนรอบสนามแม่เหล็ก จึงทำให้กระแสในขดลวดเกิดการไหลไปตามขดลวดได้

จากกฎของแอมแปร์เมื่อสนามไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กวิ่งหมุนวนรอบสนามไฟฟ้า

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการ (2.42) และ (2.43) จะเห็นว่ามึลักษณะคล้ายคลึงกันมาก ถ้าให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J ในสมการ (2.43) มีค่าเท่ากับศูนย์ จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก เช่นเดียวกับสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงทำให้เกิดสนามไฟฟ้า

เนื่องจากวัสดุตัวกลางที่ใช้ในการศึกษานี้จะพิจารณาว่ามีลักษณะที่เป็นแบบสมมาตรตลอดไม่เป็นตัวนำ ดังนั้น เมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติในตัวกลางวัสดุเหล่านี้ จะพบว่าในวัสดุตัวกลางเหล่านี้ จะไม่มีประจุอิสระ ทำให้ $\rho = 0$ และไม่มีสภาพความนำกระแส ทำให้ $\sigma = 0$ ดังนั้นความหนาแน่นของกระแส จึงเป็น $J = 0$ ด้วย เพราะว่า $J = \sigma E$ เมื่อแทนลงในสมการจะได้

$$\nabla \cdot D(r, t) = 0 \quad (2.44)$$

$$\nabla \cdot B(r, t) = 0 \quad (2.45)$$

$$\nabla \times E(r, t) = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.46)$$

$$\nabla \times H(r, t) = \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.47)$$

จากสมการแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 4 เป็นทฤษฎีสถิตสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แปรค่าตามเวลาในรูปของอนุพันธ์ย่อย โดยแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนได้แก่ ส่วนไดเวอร์เจนในสมการที่ (2.44) กับ (2.45) และส่วนเคิร์ลในสมการที่ (2.46) กับ (2.47)

ซึ่งทั้งสองส่วนนี้จะมีความสัมพันธ์กันของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ด้วยความสัมพันธ์ระหว่าง D กับ E และ B กับ H ในวัสดุ ดังนี้

$$D = \epsilon \epsilon_0 E \quad (2.48)$$

$$B = \mu \mu_0 H \quad (2.49)$$

- โดยที่ ϵ_0 คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกในสุญญากาศ
 ϵ คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพันธ์ของวัสดุ
 μ_0 คือ ค่าซึมซาบทางแม่เหล็กของสุญญากาศ
 μ คือ ค่าซึมซาบทางแม่เหล็กของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำสมการที่ (2.48) และ (2.49) แทนลงในสมการ (2.46) และ (2.47) จะได้สมการที่ (2.50) และ (2.51)

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (2.50)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.51)$$

โดยทั่วไปสนามจะแปรตามทั้งเวลาและตำแหน่งจึงเป็นฟังก์ชันที่มีความซับซ้อน แต่เนื่องจากว่าสมการแมกซ์เวลล์เป็นสมการแบบเชิงเส้นทำให้สามารถแยกพิจารณาฟังก์ชันทางเวลา และฟังก์ชันทางตำแหน่งได้อย่างเป็นอิสระ โดยพิจารณาว่าเป็นสนามแบบฮาร์โมนิกโหมดในรูปสนามเฟสเซอร์เชิงซ้อนของสมการคลื่นระนาบ ดังสมการที่ (2.52) และ (2.53)

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{H}(\mathbf{r})e^{-i\omega t} \quad (2.52)$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{r})e^{-i\omega t} \quad (2.53)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.52) และ (2.53) ในสมการที่ (2.50) และ (2.51) จะได้

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}) = i\omega\mu_0 \mathbf{H}(\mathbf{r}) \quad (2.54)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) = -i\omega\epsilon_0 \mathbf{E}(\mathbf{r}) \quad (2.55)$$

จากสมการที่ (2.50) และ (2.51) เราสามารถกำจัดตัวแปรเพื่อหาคำตอบ

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \\ \nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) &= -\mu_0 \nabla \times \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \\ \nabla^2 \mathbf{E} &= \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (2.56)$$

ในทำนองเดียวกันจะได้

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (2.57)$$

จากนั้นทำการเคิร์ลสมการที่ (2.54) เพื่อกำจัด $H(r)$ ออกไปจะได้

$$\begin{aligned}\nabla \times (\nabla \times E(r)) &= i\omega\mu_0(\nabla \times H(r)) \\ \frac{1}{\epsilon(r)} \nabla \times \nabla \times E(r) &= \frac{\omega^2}{c^2} E(r)\end{aligned}\quad (2.58)$$

และทำการเคิร์ลสมการที่ (2.55) เพื่อกำจัด $E(r)$ ออกไปจะได้

$$\begin{aligned}\nabla \times H(r) &= -i\omega\epsilon_0\epsilon(r)E(r) \\ \nabla \times \frac{1}{\epsilon(r)} \nabla \times H(r) &= \frac{\omega^2}{c^2} H(r)\end{aligned}\quad (2.59)$$

สมการที่ (2.58) และ (2.59) คือสมการหลัก ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่าผลเฉลยค่าไอเกนได้ด้วยการแก้ปัญหาค่าไอเกน เมื่อคลื่นระนาบเดินทางเข้าไปในตัวกลางวัสดุโครงสร้างผลึกโฟโตนิกส์ โดยทั่วไปการแพร่กระจายของคลื่นระนาบในผลึกโฟโตนิกส์แบบ 3 มิติ จะมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เป็นไปตามกฎมือขวา โดยมี 6 องค์ประกอบ ได้แก่ $(H_x, H_y, H_z, E_x, E_y, E_z)$

แต่อย่างไรก็ตามสำหรับผลึกโฟโตนิกส์แบบ 1 และ 2 มิติ สามารถจัดหมวดหมู่ของการแพร่กระจายคลื่นได้เป็น 2 โหมดที่แตกต่างกัน ได้แก่

โหมดคลื่นที่มีแนวสนามไฟฟ้าวางตามขวาง (Transverse Electric: TE) ซึ่งในกรณีนี้สนามแม่เหล็กจะถูกจำกัดอยู่ในแนวระนาบ xz โดยมี 3 องค์ประกอบคือ H_x, E_y, H_z จากสมการ (2.60) Helmholtz equations จะได้สมการที่ (2.61)

$$\nabla^2 \times E(r) = \frac{\omega^2}{c^2} E(r) \quad (2.60)$$

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right] E_z + \frac{\omega^2}{c^2} E_z = 0 \quad (2.61)$$

จากสมการที่ (2.61) พบว่าสมการจะเป็นจริงได้ก็ต่อเมื่อค่า $E_z = 0$ แสดงว่าจะไม่มีสนามไฟฟ้าอยู่ในทิศทางของการแพร่กระจายของคลื่นแต่จะมีเฉพาะสนามแม่เหล็กอยู่เท่านั้น

ส่วนอีกโหมดคือโหมดคลื่นที่มีแนวสนามแม่เหล็กวางตามขวาง (Transverse Magnetic: TM) ซึ่งในกรณีนี้สนามไฟฟ้าจะถูกจำกัดอยู่ในแนวระนาบ xz โดยมี 3 องค์ประกอบคือ E_x, H_y, E_z จากสมการ (2.62) Helmholtz equations จะได้สมการที่ (2.63)

$$\nabla^2 \times H(r) = \frac{\omega^2}{c^2} H(r) \quad (2.62)$$

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right] H_z + \frac{\omega^2}{c^2} H_z = 0 \quad (2.63)$$

จากสมการที่ 2.63 พบว่าสมการจะเป็นจริงได้ก็ต่อเมื่อค่า $H_z = 0$ แสดงว่าจะไม่มีสนามแม่เหล็ก อยู่ในทิศทางการแพร่กระจายของคลื่นแต่จะมีเฉพาะสนามไฟฟ้าอยู่เท่านั้น และสอดคล้องตาม เงื่อนไขของสมการที่ผ่านมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปรากฏเชิงแสงในผลึกโฟโตนิกส์ด้วยวิธีผลต่างสี่เบื้องจำกัดโดเมนเวลา (Finite Difference Time Domain) โดยการใช้โปรแกรม OptiFDTD ในการจำลองโครงสร้างเชิงแสงของผลึกโฟโตนิกส์

3.1 วิธีผลต่างสี่เบื้องจำกัดโดเมนเวลา (Finite Difference Time Domain)

ในการออกแบบโครงสร้างผลึกโฟโตนิกส์ด้วยวิธีผลต่างสี่เบื้องจำกัดโดเมนเวลา (FDTD) โดยการใช้โปรแกรม OptiFDTD ซึ่งโปรแกรม OptiFDTD เป็นโปรแกรมที่มีประสิทธิภาพและยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย อีกทั้งยังช่วยออกแบบจำลองเชิงแสงของผลึกโฟโตนิกส์ได้

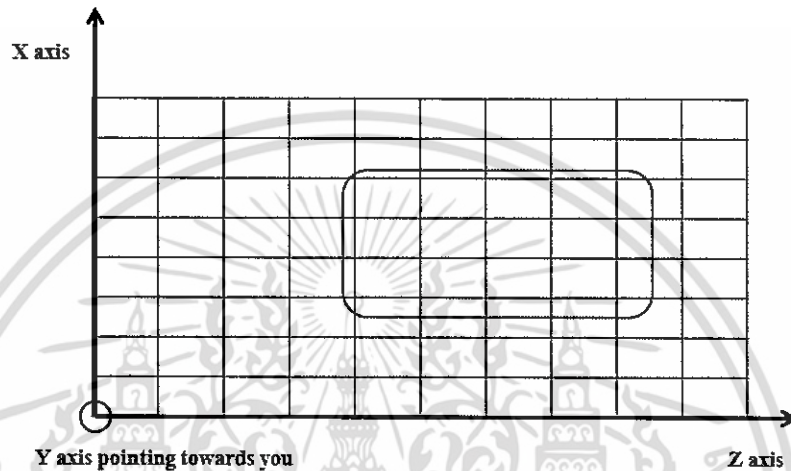
โปรแกรม OptiFDTD คือโปรแกรมที่ใช้หลักการพื้นฐานแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีผลต่างสี่เบื้องจำกัดโดเมนเวลาหรือเรียกอีกอย่างว่า FDTD ซึ่ง FDTD เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นที่ยอมรับในประสิทธิภาพการใช้งาน โดยคุณสมบัติโดยรวมของ FDTD คือ สามารถทำการสร้างแบบจำลองของการเคลื่อนที่ของแสง การสะท้อนของแสง การกระเจิงของแสง การเลี้ยวเบนของแสงและการโพราไรซ์ของแสง วิธีการ FDTD ทำให้การจำลองผลึกโฟโตนิกส์มีประสิทธิภาพสูง ทั้งยังสามารถทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโฟโตนิกส์ในระดับไมครอนละมีรายละเอียดมากๆ ได้ โดยจะแสดงให้เห็นถึงการกักเก็บแสง ซึ่งดัชนีหักเหส่วนใหญ่ของสารกึ่งตัวนำจะมีค่าที่แตกต่างกัน

3.2 สมการของวิธีผลต่างสี่เบื้องจำกัดโดเมนเวลา (Finite Difference Time Domain) ในระบบ 2 มิติ

วิธีผลต่างสี่เบื้องจำกัดโดเมนเวลาเป็นวิธีแก้ปัญหาเชิงตัวเลขของสมการแมกซ์เวลล์ที่ขึ้นกับเวลา โดยโปรแกรม OptiFDTD สามารถสร้างให้อยู่ในระบบ 2 มิติ ซึ่งจะวางในระนาบแกน X และ Z ซึ่งแสงจะเคลื่อนที่ไปตามแนวแกน Z และแกน Y จะถูกกำหนดให้เป็นระนาบอนันต์ ทำให้สามารถตัดทอนอนุพันธ์ของแกน Y จากสมการแมกเวลล์ได้ทั้งหมด และสามารถแยกสมการได้เป็น 2 ส่วน คือ สนามแม่เหล็กวางตามขวาง และสนามไฟฟ้าวางตามขวาง การคำนวณขอบเขตในระบบ 2 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าระยะที่เปลี่ยนไปในแกน X และ Y คือ ΔX และ ΔZ ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.1 โดยแต่ละเมช (mesh) จะมีความเกี่ยวข้องเฉพาะตัวกับชนิดของสารกึ่งตัวนำ และมีคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำในแต่ละชนิด เช่น ค่าดัชนีหักเหของแสง และการกระเจิงของแสง



รูปที่ 3.1 แสดงการคำนวณเชิงตัวเลขของขอบเขตในระบบ 2 มิติ

3.3 คลื่นที่มีแนวสนามไฟฟ้าวางตามขวาง (Transverse Electric wave; TE)

คลื่นที่มีแนวสนามไฟฟ้าวางตามขวางในระบบ 2 มิติ จะมี E_y เกิดขึ้นบนแลตทิซที่โหนด (node) ทั้ง 4 ของแต่ละเมช และจะมีสนามแม่เหล็ก H_x และ H_z หมุนวนอยู่รอบแลตทิซ โดยมีรูปแบบสมการแมกซ์เวลล์ดังนี้

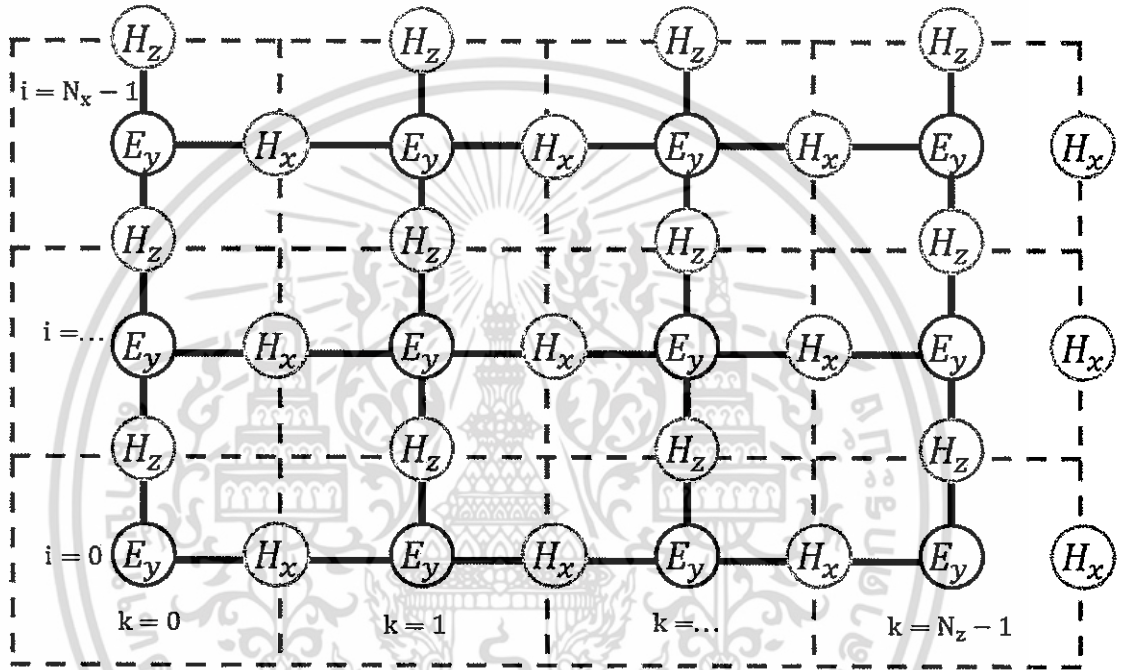
$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial E_y}{\partial z} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ คือค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุ (dielectric permittivity) และ μ_0 คือค่าซึมซาบทางแม่เหล็กของสุญญากาศ (magnetic permeability) โดยค่าดัชนีหักเหคือ $n = \sqrt{\epsilon_r}$ ซึ่งกรณีของคลื่นที่มีแนวสนามไฟฟ้าวางตามขวางในระบบ 2 มิติ จะมีตำแหน่งของสนามไฟฟ้าในเมช (mesh) เป็นดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ตำแหน่งสนามไฟฟ้าของคลื่นที่มีแนวสนามไฟฟ้าวางตามขวางในระบบ 2 มิติ

จากรูปที่ 3.2 เส้นสีน้ำเงินหมายถึงเมช (mesh) ซึ่งกำหนดให้สนามไฟฟ้า E_y อยู่ตรงกลางของช่องที่เป็นเส้นประสีชมพูหมายถึงพื้นที่ที่เป็นช่องใน FDTD โดยกำหนดให้สนามแม่เหล็ก H_x และ H_z เป็นไปตามรูป และตำแหน่งของสนามไฟฟ้าจะสอดคล้องกับคู่อันดับ i และ k ซึ่งสนามแม่เหล็ก H_x คือจำนวนคู่อันดับ i และ $(k+1/2)$ สนามแม่เหล็ก H_z คือจำนวนคู่อันดับ $(i+1/2)$ และ k

จากสมการวิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดเมนเวลา

$$\frac{\partial F^n(i,j,k)}{\partial t} = \frac{F^{n+1/2}(i,j,k) - F^{n-1/2}(i,j,k)}{\Delta t} \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial F^n(i,j,k)}{\partial t} = \frac{F^n(i+1/2,j,k) - F^n(i-1/2,j,k)}{\Delta t} \quad (3.5)$$

นำสมการที่ (3.1) มาคำนวณหาผลเฉลยของสมการโดยใช้สมการที่ (3.4) และ (3.5) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{E_y^n(i,k) - E_y^{n-1}(i,k)}{\Delta t} &= \frac{1}{\epsilon} \frac{H_x^{n-\frac{1}{2}}(i,k+\frac{1}{2}) - H_x^{n-\frac{1}{2}}(i,k-\frac{1}{2})}{\Delta z} - \frac{1}{\epsilon} \frac{H_z^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2},k) - H_z^{n-\frac{1}{2}}(i-\frac{1}{2},k)}{\Delta x} \\ E_y^n(i,k) &= E_y^{n-1}(i,k) + \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta z} \left[H_x^{n-\frac{1}{2}}(i,k+\frac{1}{2}) - H_x^{n-\frac{1}{2}}(i,k-\frac{1}{2}) \right] \\ &\quad - \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta x} \left[H_z^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2},k) - H_z^{n-\frac{1}{2}}(i-\frac{1}{2},k) \right] \end{aligned} \quad (3.6)$$

จากสมการที่ (3.2) จะได้ H_x เป็น

$$\begin{aligned} \frac{H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,k+\frac{1}{2}) - H_x^{n-\frac{1}{2}}(i,k+\frac{1}{2})}{\Delta t} &= \frac{1}{\mu_0} \frac{E_y^n(i,k+1) - E_y^n(i,k)}{\Delta z} \\ H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,k+\frac{1}{2}) &= H_x^{n-\frac{1}{2}}(i,k+\frac{1}{2}) + \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta z} [E_y^n(i,k+1) - E_y^n(i,k)] \end{aligned} \quad (3.7)$$

จากสมการที่ (3.2) จะได้ H_z เป็น

$$\begin{aligned} \frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+1/2,k) - H_z^{n-\frac{1}{2}}(i+1/2,k)}{\Delta t} &= -\frac{1}{\mu_0} \frac{E_y^n(i+1,k) - E_y^n(i,k)}{\Delta x} \\ H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2},k) &= H_z^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2},k) - \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta x} [E_y^n(i+1,k) - E_y^n(i,k)] \end{aligned} \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ n คือ จำนวนสเตปของเวลา (time step)
- i, k คือ ตำแหน่งของแลตทิซในระบบ xy
- $\Delta x, \Delta z$ คือ ระยะระหว่างตำแหน่งของแลตทิซในทิศทาง x และ y
- Δt คือ เวลาที่เพิ่มขึ้น

การวิเคราะห์ความถี่เชิงซ้อน (Complex Frequency Analysis) คือการคำนวณหาผลเฉลยของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งต้องคำนึงถึงความเสถียรภาพ (Stability) ของวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลา โดยถูกกำหนดด้วยเกณฑ์ความเสถียรของคูรันต์ (Courant limit) คือ

$$\Delta t \leq \frac{1}{c\sqrt{1/\Delta x^2 + 1/\Delta z^2}} \quad (3.9)$$

ในการคำนวณเชิงตัวเลขจะต้องมีการระบุ time step ที่ใช้สำหรับการคำนวณ โดยเกณฑ์ความเสถียรของคูรันต์ กำหนดขนาดของช่วงเวลา (Time Step) เพื่อให้การจำลองมีเสถียรภาพ ตัวอย่างเช่น การเลือกขนาด Δt สำหรับการจำลองนำไปสู่ความไม่แน่นอนไม่ได้ เนื่องจากมีข้อผิดพลาดในการตัดตัวเลขน้อยๆที่เกิดขึ้นในคอมพิวเตอร์ โดย c คือ ความเร็วแสง (speed of light)

3.4 คลื่นที่มีแนวสนามแม่เหล็กวางตามขวาง (Transverse magnetic wave; TM)

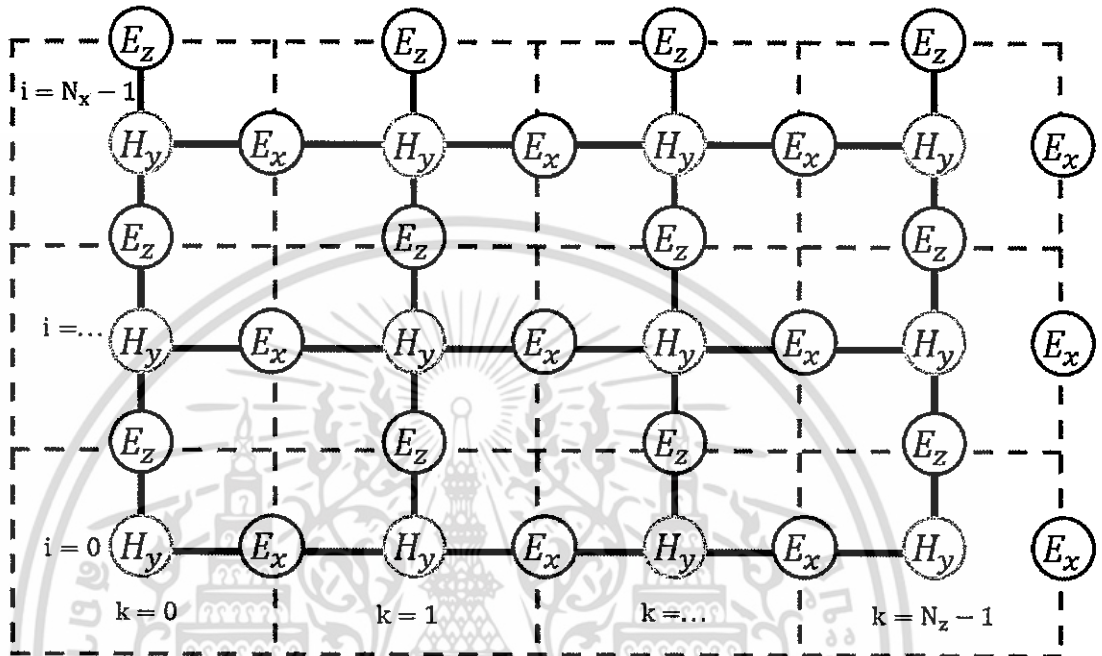
คลื่นที่มีแนวสนามแม่เหล็กวางตามขวางในระบบ 2 มิติ จะมี H_y เกิดขึ้นบนแลตทิซที่โหนด (node) ทั้ง 4 ของแต่ละเมช และจะมีสนามแม่เหล็ก E_x และ E_z หมุนวนอยู่รอบแลตทิซ โดยมีรูปแบบสมการแมกซ์เวลล์ดังนี้

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial H_y}{\partial z} \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = -\frac{1}{\epsilon} \frac{\partial H_y}{\partial x} \quad (3.12)$$



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งสนามแม่เหล็กของคลื่นที่มีแนวสนามแม่เหล็กวางตามขวางในระบบ 2 มิติ

จากรูปที่ 3.3 เส้นสีแดงหมายถึงเมช (mesh) ซึ่งกำหนดให้สนามแม่เหล็ก H_y อยู่ตรงกลางของช่องที่เป็นเส้นประสีชมพูหมายถึงพื้นที่ที่เป็นช่องใน FDTD โดยกำหนดให้สนามไฟฟ้า E_x และ E_z เป็นไปตามรูป

นำสมการที่ (3.10) มาคำนวณหาผลเฉลยของสมการโดยใช้สมการที่ (3.4) และ (3.5) จะได้

$$\frac{H_y^n(i,k) - H_y^{n-1}(i,k)}{\Delta t} = \frac{1}{\mu_0} \frac{E_x^{n-\frac{1}{2}}(i,k+\frac{1}{2}) - E_x^{n-\frac{1}{2}}(i,k-\frac{1}{2})}{\Delta z} - \frac{1}{\mu_0} \frac{E_z^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2},k) - E_z^{n-\frac{1}{2}}(i-\frac{1}{2},k)}{\Delta x}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
H_y^n(i, k) = H_y^{n-1}(i, k) + \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta z} \left[E_x^{n-\frac{1}{2}}\left(i, k + \frac{1}{2}\right) - E_x^{n-\frac{1}{2}}\left(i, k - \frac{1}{2}\right) \right] \\
- \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta x} \left[E_z^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, k\right) - E_z^{n-\frac{1}{2}}\left(i - \frac{1}{2}, k\right) \right]
\end{aligned} \quad (3.13)$$

จากสมการที่ (3.11) จะได้ E_x เป็น

$$\begin{aligned}
\frac{H_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i, k + \frac{1}{2}\right) - H_x^{n-\frac{1}{2}}\left(i, k + \frac{1}{2}\right)}{\Delta t} &= \frac{1}{\varepsilon} \frac{E_y^n(i, k+1) - E_y^n(i, k)}{\Delta z} \\
H_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i, k + \frac{1}{2}\right) &= H_x^{n-\frac{1}{2}}\left(i, k + \frac{1}{2}\right) \\
&+ \frac{\Delta t}{\varepsilon \Delta z} [E_y^n(i, k+1) - E_y^n(i, k)]
\end{aligned} \quad (3.14)$$

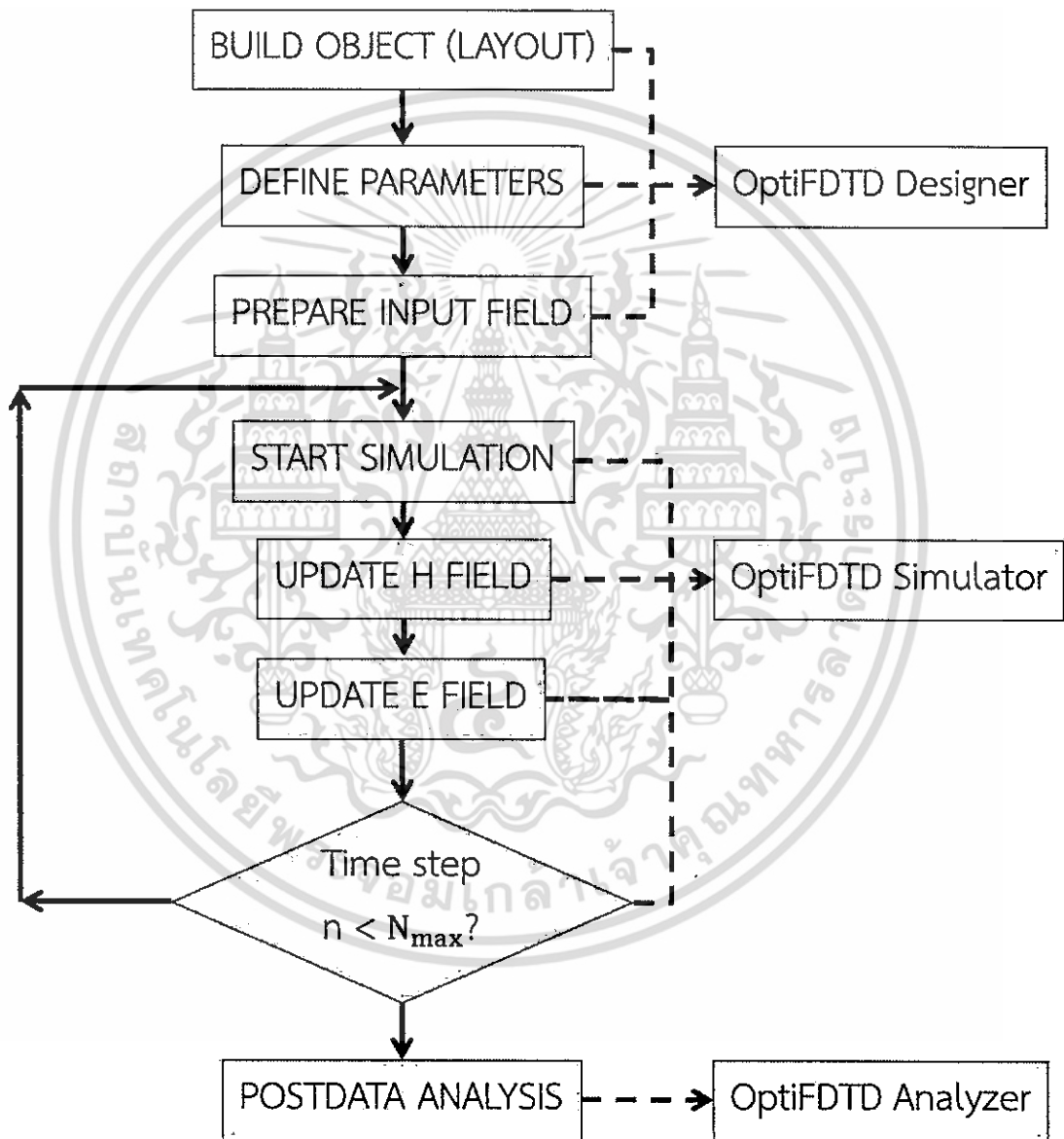
จากสมการที่ (3.12) จะได้ E_z เป็น

$$\begin{aligned}
\frac{E_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, k\right) - E_z^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, k\right)}{\Delta t} &= -\frac{1}{\varepsilon} \frac{H_y^n(i+1, k) - H_y^n(i, k)}{\Delta x} \\
E_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, k\right) &= E_z^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, k\right) \\
&- \frac{\Delta t}{\varepsilon \Delta x} [H_y^n(i+1, k) - H_y^n(i, k)]
\end{aligned} \quad (3.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ขั้นตอนการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม OptiFDTD

สำหรับการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีผลต่างสลับเนื่องจำกัดโดเมนเวลา ในโปรแกรม OptiFDTD ซึ่งขั้นตอนการทำงานในโปรแกรม OptiFDTD สามารถเขียนเป็นรูปแบบ Flow Chart ได้ ดังนี้

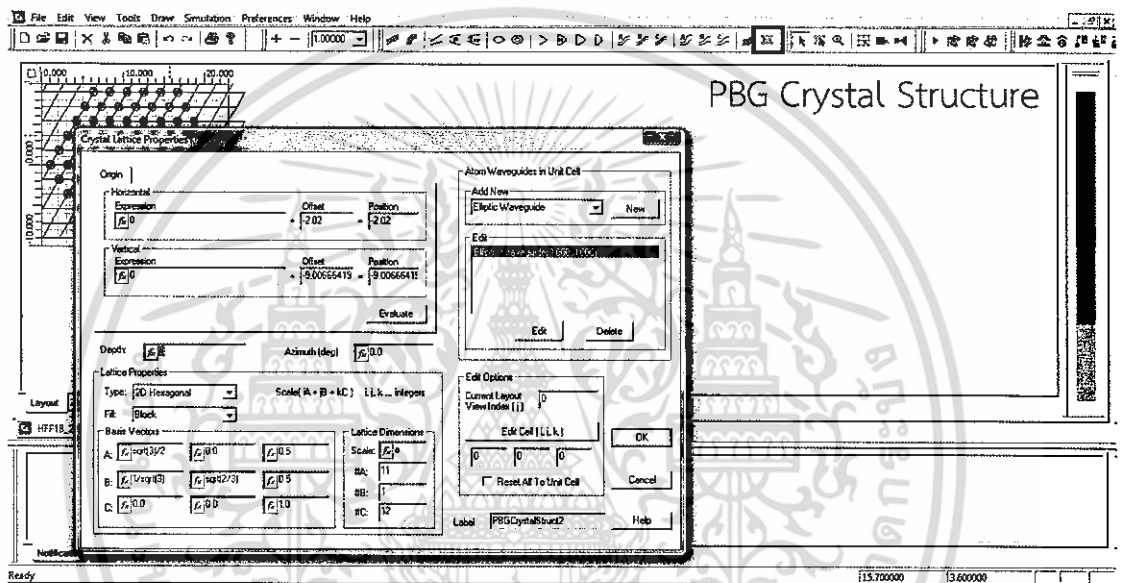


รูปที่ 3.4 Flow Chart ของการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี FDTD ในโปรแกรม OptiFDTD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

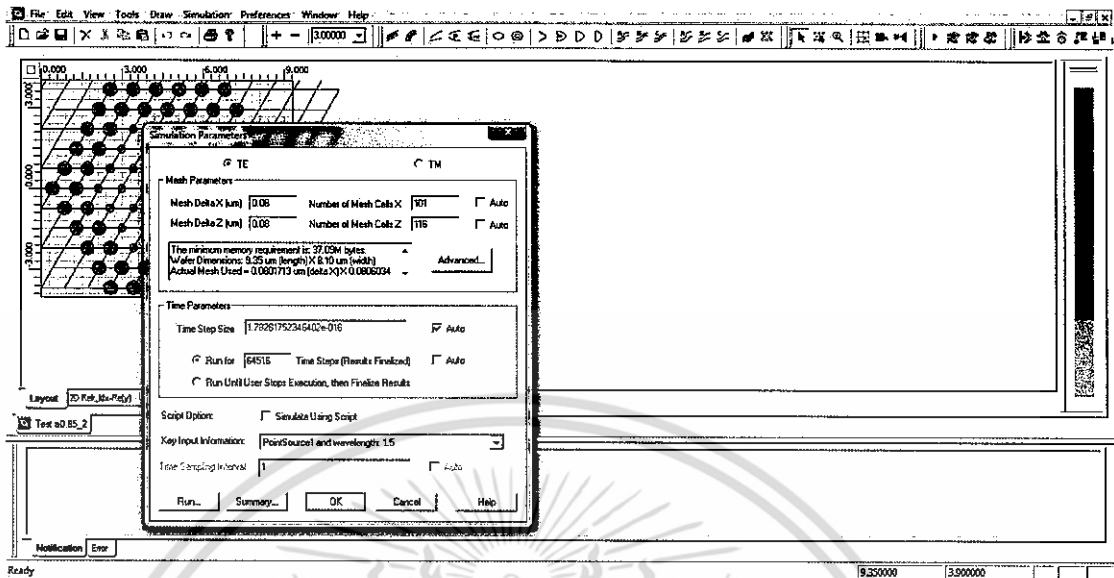
รูปแบบ Flow Chart สามารถทำการแบ่งได้เป็น 3 ส่วนด้วยกันดังนี้

1. OptiFDTD Designer คือส่วนของโปรแกรมที่ใช้ในการสร้างวัสดุขึ้นมา ซึ่งทำการกำหนดพารามิเตอร์ของแผ่นงาน โดยจะทำการกำหนดค่าดัชนีหักเหของแสงเท่ากับ 1.46 ซึ่งเป็นค่าดัชนีหักเหของซิลิกา จากนั้นทำการออกแบบโครงสร้างของผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ และทำการสร้างแบบจำลองขึ้นมาโดยใช้ PBG crystal structure จากนั้นจะปรากฏหน้าต่างขึ้นมาเพื่อป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และทำการออกแบบให้มีการจัดเรียงตัวแบบหกเหลี่ยมที่มี 5 ชั้น ดังรูป 3.5



รูปที่ 3.5 การออกแบบโดยการใช้ PBG Crystal Structure

2. OptiFDTD Simulation คือส่วนของโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองงาน ซึ่งสามารถพิจารณาได้ทั้งสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าโดยจะทำการกำหนดจำนวนของ time-step เท่ากับ 64,516 ดังรูปที่ 3.6 และจะแสดงผลในรูปแบบกราฟิก เมื่อครบตามจำนวนรอบที่ใส่เข้าไป โปรแกรมจะทำการแสดงผลทางหน้าจอในรูปแบบของฟังก์ชันเวลา

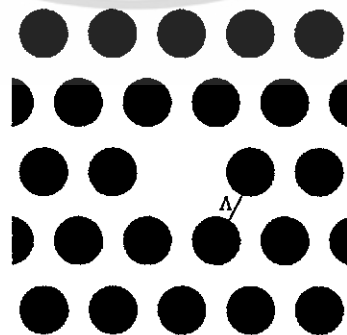


รูปที่ 3.6 การ simulation แบบ 2D Simulation

3. OptiFDTD Analyzer คือส่วนของโปรแกรมที่วิเคราะห์ผลเฉลยของการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ ซึ่งโปรแกรมจะแสดงผลออกมาในรูปแบบ Discrete Fourier Transform (DFT) โดยสามารถอ่านความเข้มแสงจากแอมพลิจูดที่แต่ละความยาวคลื่นได้ และยังสามารถอ่านค่าจินตภาพได้

3.6 การออกแบบโครงสร้างของผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ

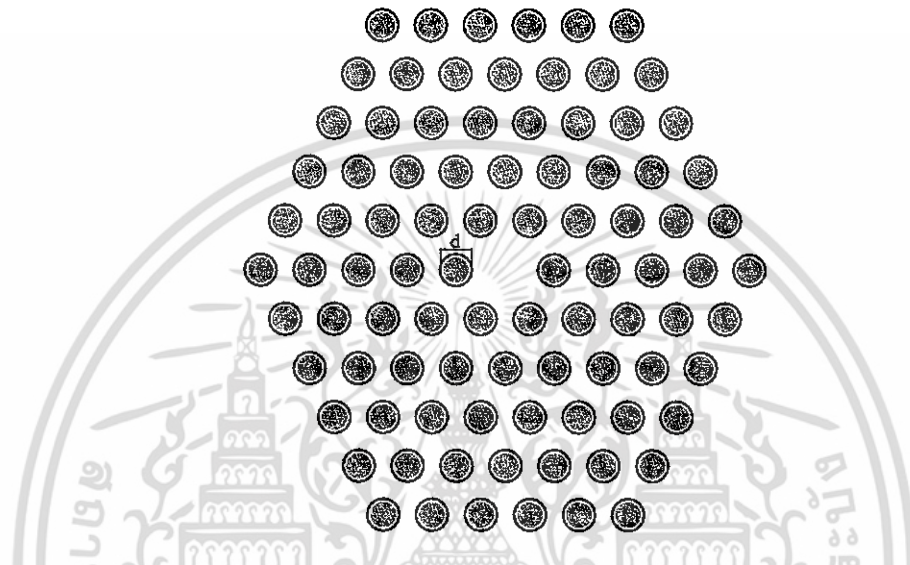
การออกแบบโครงสร้างของท่อนำคลื่นในโพลีเมอร์มีโครงสร้างแบบ 2 มิติ โดยกำหนดให้ส่วนที่อยู่ล้อมรอบ core คือรูของอากาศที่มีการจัดเรียงตัวแบบหกเหลี่ยม และ core ของท่อนำคลื่นคือรูของอากาศที่หายไป ซึ่งสารไดอิเล็กตริกที่นำมาใช้คือซิลิกาที่มีค่าดัชนีหักเห $n=1.46$ โดยสารไดอิเล็กตริกของ core และ cladding คือสารตัวเดียวกัน และความยาวคลื่นที่ใช้คือ $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$



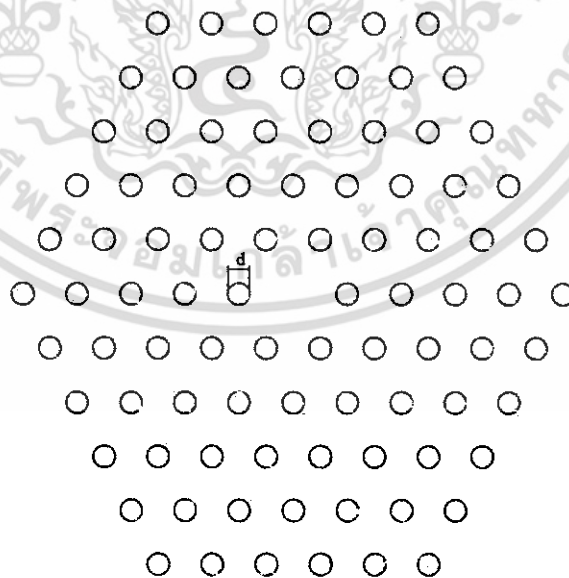
รูปที่ 3.7 ลักษณะการจัดเรียงตัวของท่อนำคลื่นในโพลีเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนแรกเราทำการกำหนดจำนวนของชั้นรูของอากาศที่ล้อมรอบ core ซึ่งเรากำหนดให้มีชั้นทั้งหมด 5 ชั้น และทำการกำหนดขนาดรูของอากาศโดยกำหนดให้เส้นผ่าศูนย์กลาง (d) อยู่ที่ $0.2 \mu\text{m}$ ถึง $0.6 \mu\text{m}$ และกำหนดให้ระยะห่างของหลุม (Λ) เท่ากับ $0.85 \mu\text{m}$ ถึง $2.40 \mu\text{m}$ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.8 และ 3.9



รูปที่ 3.8 การออกแบบโครงสร้างของท่อนำคลื่นของผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ ที่ $d=0.5 \mu\text{m}$

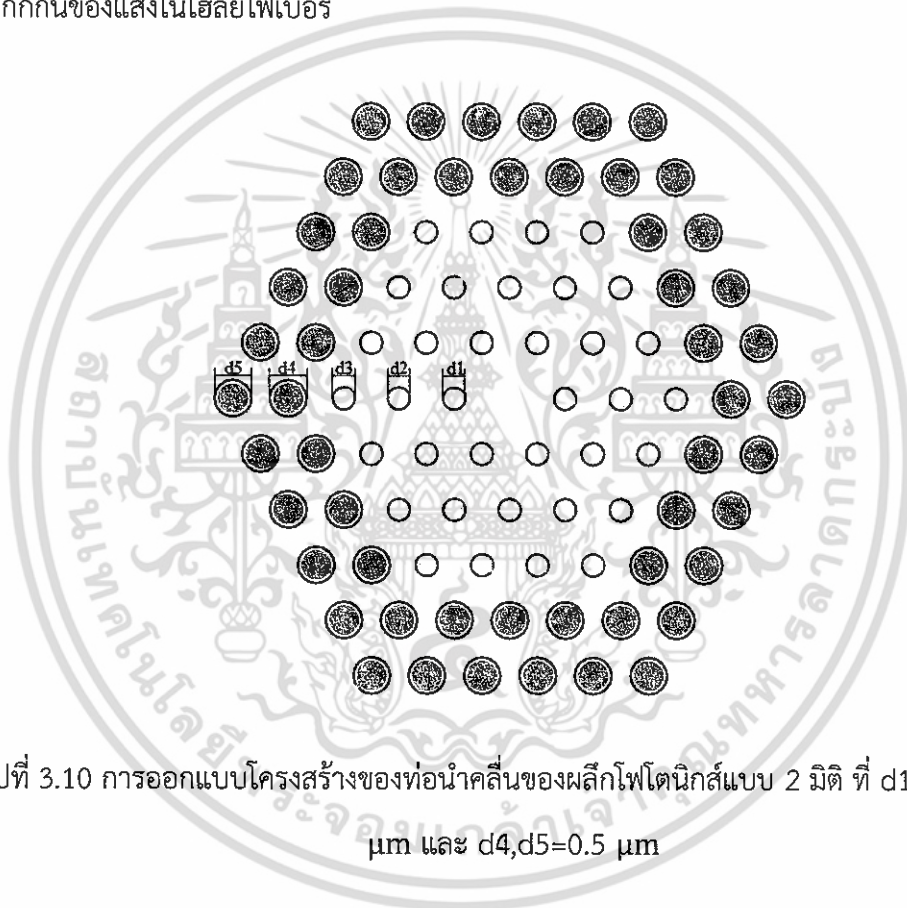


รูปที่ 3.9 การออกแบบโครงสร้างของท่อนำคลื่นของผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ ที่ $d=0.3 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 3.8 และ 3.9 เป็นรูปที่แสดงรูของอากาศที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ต่างกัน ซึ่งรูปที่ 3.8 มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ $0.5 \mu\text{m}$ และรูปที่ 3.9 มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ $0.3 \mu\text{m}$ โดยแสงที่เคลื่อนที่ในท่อนำคลื่นจะเคลื่อนที่ในบริเวณ core ของโพลีเมอร์

ในส่วนที่สองเราจะทำการเปลี่ยนรูของอากาศให้แต่ละชั้นให้มีขนาดของรูที่ต่างกัน ยกตัวอย่างตามรูปที่ 3.10 ซึ่งจากรูปที่ 3.10 เส้นผ่าศูนย์กลางของ 3 ชั้นที่อยู่ด้านในจะมีค่าเท่ากับ $0.3 \mu\text{m}$ และ 2 ชั้นที่อยู่ชั้นนอกมีค่าเท่ากับ $0.5 \mu\text{m}$ จากนั้นนำผลที่ได้ไปหาค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสงในโพลีเมอร์



รูปที่ 3.10 การออกแบบโครงสร้างของท่อนำคลื่นของผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ ที่ $d_1, d_2, d_3 = 0.3 \mu\text{m}$ และ $d_4, d_5 = 0.5 \mu\text{m}$

3.7 ค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสง

ใน PCF มีจำนวนรูของอากาศจำนวนมากในส่วนที่หุ้มผลึกโฟโตนิกส์ที่ทำให้เกิดการสูญเสียของแสง อย่างไรก็ตามเส้นใยประดิษฐ์ขึ้นมาตามจำนวนรูของอากาศที่แน่นอน ดังนั้นที่ guided mode จะมีการรั่วออก

การสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสง CL ของโหมดจะสรุปได้จากค่าคงที่การลดทอนของสัญญาณ α จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$CL = 20 \alpha \log_{10} e = 8.686\alpha \quad (3.16)$$

เมื่อค่าคงที่เชิงซ้อนมีค่าเป็น

$$\gamma = \alpha + jk_0 n_{\text{eff}} \quad (3.17)$$

นำสมการที่ (3.17) แทนในสมการที่ (3.16) จะได้

$$CL = 8.686k_0 \text{Im}(n_{\text{eff}}) \quad (3.18)$$

เมื่อ CL คือ ค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสง

k_0 คือ ค่าเวกเตอร์คลื่น

$\text{Im}(n_{\text{eff}})$ คือ ส่วนจินตภาพของดัชนีหักเหประสิทธิผล



บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

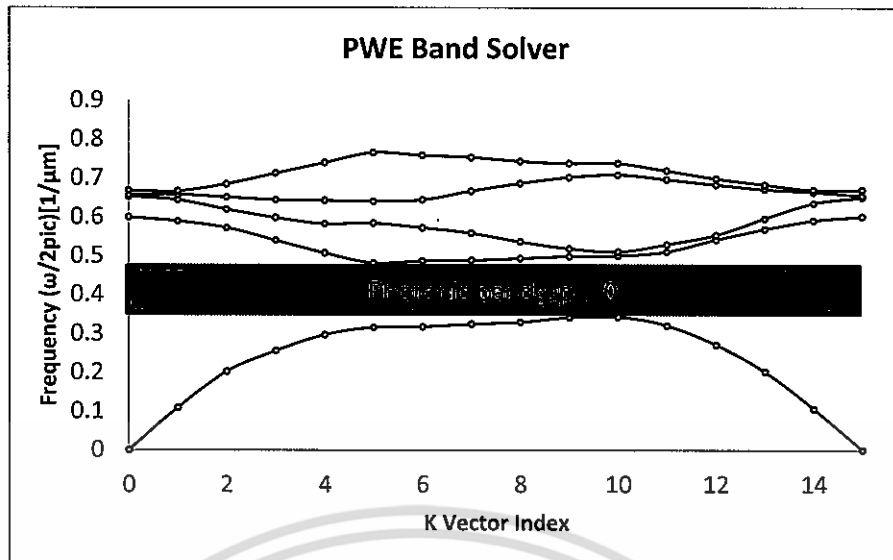
จากการออกแบบและจำลองโครงสร้างของผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติที่มีการจัดเรียงตัวแบบหกเหลี่ยม โดยใช้วิธีจำลองโครงสร้างผ่านโปรแกรม OptiFDTD และจึงทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ โดยทำการแบ่งกรณีศึกษาวิจัยออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ผลึกโฟโตนิกส์แบบหกเหลี่ยมมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของรูอากาศเท่ากันทุกชั้น และกรณีที่ผลึกโฟโตนิกส์แบบหกเหลี่ยมมีขนาดของรูอากาศในแต่ละชั้นแตกต่างกัน

4.1 โครงสร้างผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ ที่มีการจัดเรียงตัวแบบหกเหลี่ยม

การออกแบบโครงสร้างผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ โดยกำหนดค่าอัตราส่วนตัวแปรทางโครงสร้าง r/Λ ไว้ที่ 0.18 โดยใช้วิธีการจำลองผลทางคณิตศาสตร์ผ่านโปรแกรม OptiFDTD ซึ่งจะทำให้การคำนวณโครงสร้างแถบช่องว่างเชิงแสงโฟโตนิกส์ และคำนวณค่าสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสง

4.1.1 การคำนวณแถบช่องว่างเชิงแสงโฟโตนิกส์แบบโหมด TE

จากการออกแบบโครงสร้างผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ ที่มีการจัดเรียงตัวแบบหกเหลี่ยม โดยกำหนดอัตราส่วน r/Λ ไว้ที่ 0.18 ซึ่งเราจะหาแถบช่องว่างเชิงแสงด้วยวิธี PWE และทำการกำหนดโหมดไปที่โหมด TE จะพบว่าเกิดแถบช่องว่างเชิงแสงจำนวน 1 แถบ ได้แก่แถบช่องว่างที่ 0 เท่ากับ $0.342658 - 0.481144$ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยเราสามารถทำการคำนวณหาความยาวคลื่นได้จาก normalized frequencies (Λ/λ) ซึ่งจะได้แถบช่องว่างที่ 0 เป็น $0.342658 \leq \frac{\Lambda}{\lambda} \leq 0.481144$ ดังนั้นจะได้ความยาวคลื่นแถบช่องว่างที่ 0 เท่ากับ $1.7667 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 2.4806 \mu\text{m}$ ซึ่งผลที่ได้ทำให้เราทราบว่าโครงสร้างผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติที่ทำการออกแบบอยู่ในย่านของการสื่อสาร



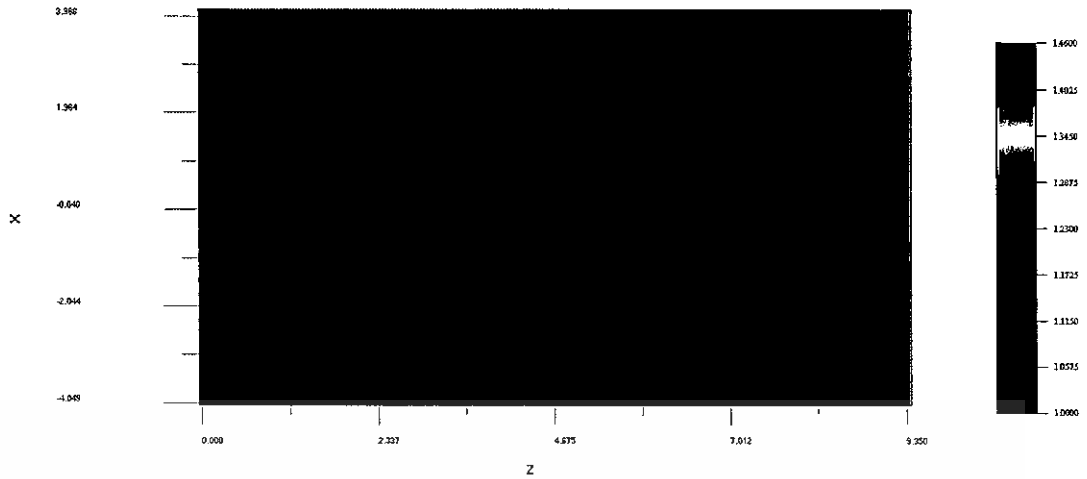
รูปที่ 4.1 แถบช่องว่างเชิงแสงแบบโหมด TE (จากโปรแกรม OptiFDTD)

4.2 การจำลองการออกแบบโครงสร้างผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ ที่มีการจัดเรียงตัวแบบหกเหลี่ยม

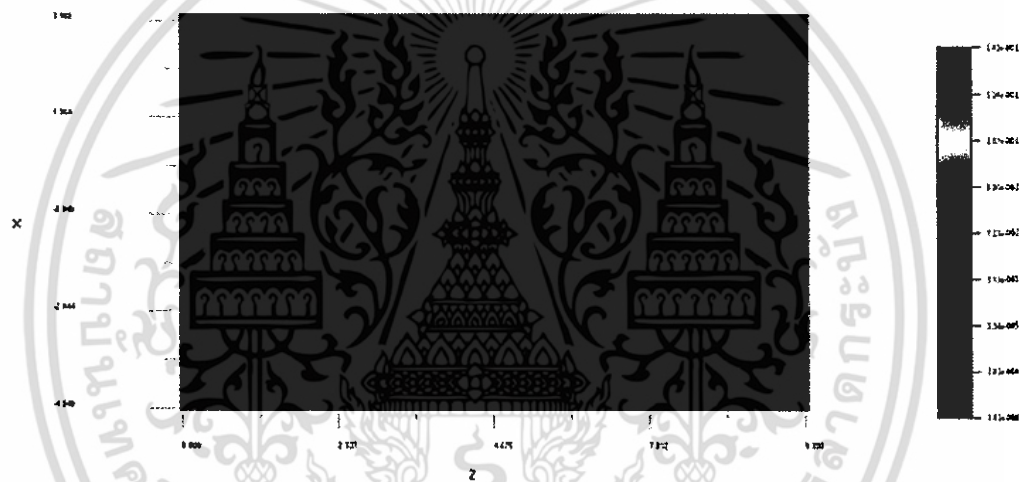
จากการจำลองการเคลื่อนที่ของแสงโดยทำการเลือกความยาวคลื่นที่ 1.55 ไมครอน (ความยาวคลื่นที่ยานการสื่อสาร) และทำการป้อนคลื่นแบบ Gaussian pulse จากนั้นจะได้ผลที่เป็นลักษณะของแสงและปริมาณของแสงที่ออกมา

4.2.1 โครงสร้างผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ ที่มีการจัดเรียงตัวแบบหกเหลี่ยม โดยเปลี่ยนขนาดของรูอากาศเท่ากันทุกชั้น

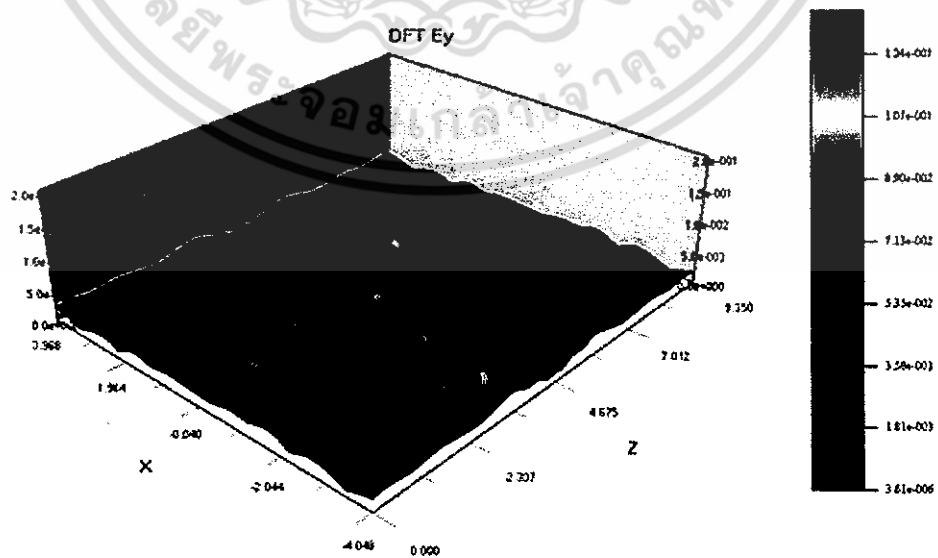
การจำลองผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ เป็นการจำลองการเคลื่อนที่ของแสง โดยทำการเปลี่ยนขนาดของรูอากาศ ซึ่งจะทำการกำหนดขนาดรูของอากาศโดยกำหนดให้เส้นผ่าศูนย์กลาง (d) อยู่ที่ $0.2 \mu\text{m}$ ถึง $0.6 \mu\text{m}$ โดยผลที่แสดงออกมาจะเป็นการจำลองเชิงกราฟิก ด้วยโปรแกรม FDTD ซึ่งใช้หลักการของ FDTD ที่โหมด TE ดังแสดงในรูปที่ 4.2 , 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.2 การออกแบบผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ ที่มีการเรียงตัวแบบหกเหลี่ยม โดยเปลี่ยนขนาดของรูอากาศเท่ากันทุกวง



รูปที่ 4.3 รูปแบบการแสดงผลแบบ Image map โดยขนาดของรูอากาศเท่ากันทุกวงที่โหมด TE



รูปที่ 4.4 รูปแบบการแสดงผลแบบ Height Plot โดยขนาดของรูอากาศเท่ากันทุกวงที่โหมด TE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 โครงสร้างผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ ที่มีการจัดเรียงตัวแบบหกเหลี่ยม โดยเปลี่ยนขนาดของรูอากาศในแต่ละชั้นแตกต่างกัน

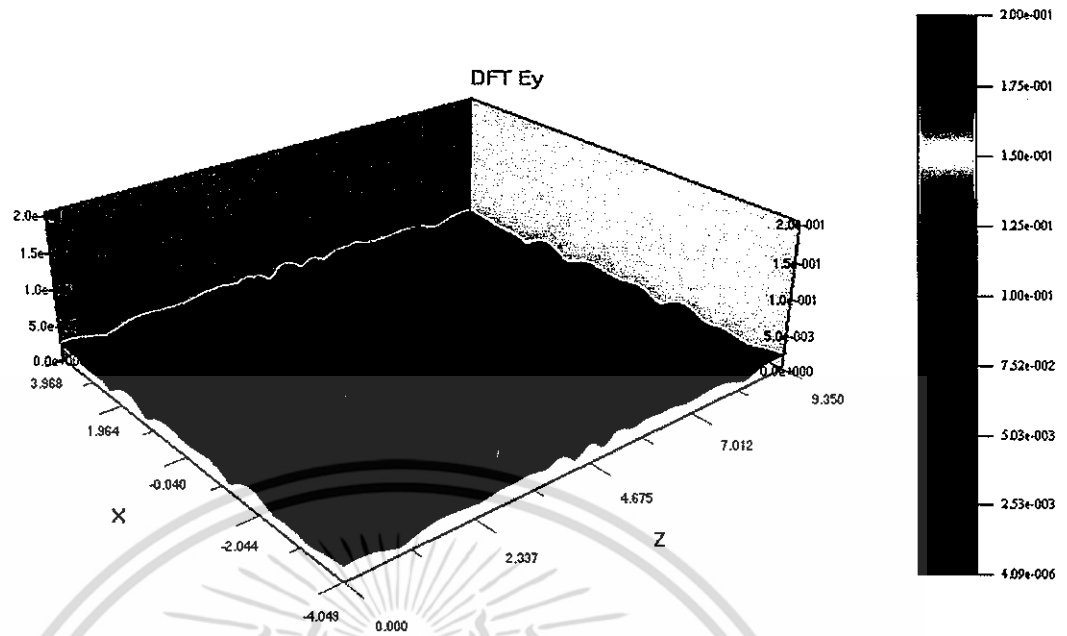
การจำลองผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ โดยทำการเปลี่ยนให้ขนาดของรูอากาศในแต่ละชั้นมีค่าที่แตกต่างกัน ซึ่งจะทำให้การกำหนดขนาดรูของอากาศโดยกำหนดให้เส้นผ่าศูนย์กลาง (d) อยู่ที่ $0.2 \mu\text{m}$ ถึง $0.6 \mu\text{m}$ ที่โหมด TE จะ แสดงผลตามรูปที่ 4.5 , 4.6 และ 4.7



รูปที่ 4.5 การออกแบบผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ ที่มีการเรียงตัวแบบหกเหลี่ยม โดยเปลี่ยนขนาดของรูอากาศให้แต่ละชั้นแตกต่างกัน



รูปที่ 4.6 รูปแบบการแสดงผลแบบ Image map โดยขนาดของรูอากาศในแต่ละชั้นแตกต่างกันที่โหมด TE



รูปที่ 4.7 รูปแบบการแสดงผลแบบ Height Plot โดยขนาดของรูอากาศในแต่ละชั้นแตกต่างกันที่ โหมด TE

4.3 การวิเคราะห์ผลของผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ ที่เรียงตัวแบบหกเหลี่ยม

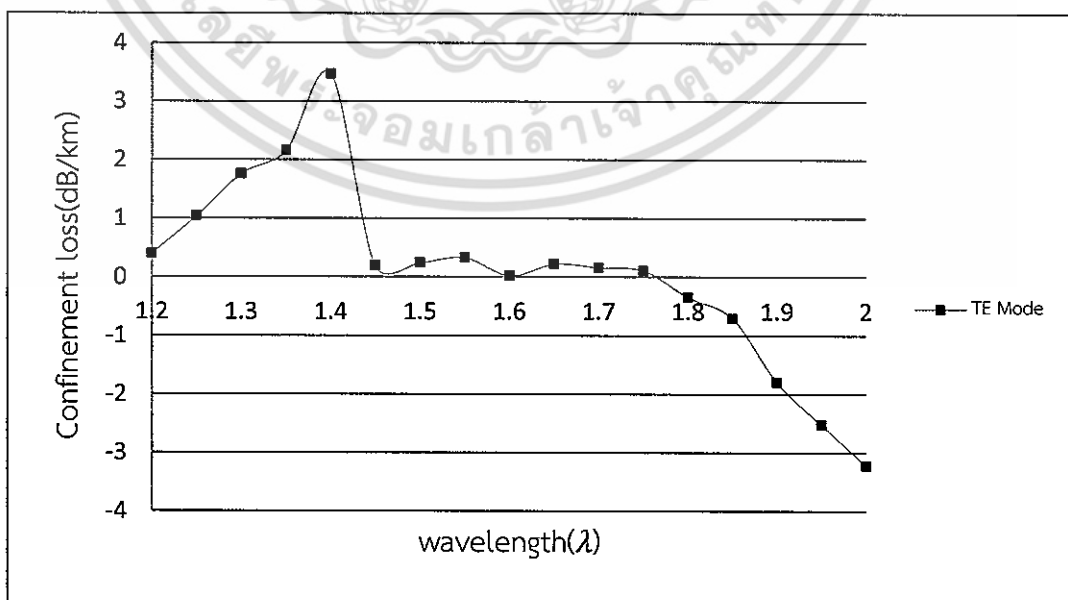
จากผลการทดลองเราพบว่าเมื่อเราทำการจำลองผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ ที่เรียงตัวแบบหกเหลี่ยม โดยโปรแกรม OptiFDTD โปรแกรมจะทำการแสดงผลออกมาในรูปแบบของจำนวนเชิงซ้อน (Imaginary part) โดยทำการแสดงค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสงในผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติในโหมด TE ดังตารางที่ 4.1 4.2 และ 4.3 ซึ่งสามารถคำนวณค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสงจากสมการที่ (3.18) โดยจะทำการยกตัวอย่างการคำนวณค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสงที่ $d_1, d_2, d_3 = 0.3 \mu\text{m}$ และ $d_4, d_5 = 0.5 \mu\text{m}$ ในโหมด TE จากสมการที่ (3.18) จะได้

$$\begin{aligned} CL &= 8.686k_0 \text{Im}(n_{\text{eff}}) \\ CL &= 8.686 \times \frac{2\pi}{1.55 \times 10^{-6}} \times (4.7222165794738 \times 10^{-13}) \\ &= 1.6627 \times 10^{-5} \text{ dB/m} \\ &= 0.016627 \text{ dB/km} \end{aligned}$$

ซึ่งเมื่อทำการคำนวณค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสงพบว่าจะได้ค่าเท่ากับ 1.6627×10^{-5} dB/m และ 0.016627 dB/km

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลของค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสงในผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ ในโหมด TE ที่ $d=0.3 \mu\text{m}$

Wavelength (μm)	Imaginary part	CL (dB/m)	CL (dB/km)
1.20	$1.03731534964163 \times 10^{-11}$	0.000366	0.366181
1.25	$2.44241581576939 \times 10^{-11}$	0.000859	0.859117
1.30	$4.67567159538928 \times 10^{-11}$	0.001648	1.647815
1.35	$7.78310038013675 \times 10^{-11}$	0.002739	2.739316
1.40	$9.31799620697813 \times 10^{-11}$	0.003282	3.281545
1.45	$1.81281514600144 \times 10^{-12}$	0.000064	0.06373
1.50	$3.9530910373961 \times 10^{-12}$	0.000139	0.139078
1.55	$5.80571610014303 \times 10^{-12}$	0.000205	0.204568
1.60	$5.96748068720785 \times 10^{-13}$	0.000021	0.021011
1.65	$6.79369942039499 \times 10^{-12}$	0.000239	0.239074
1.70	$5.23982023657987 \times 10^{-12}$	0.000184	0.184499
1.75	$4.90391903854451 \times 10^{-12}$	0.000173	0.172528
1.80	$-8.42569968420436 \times 10^{-11}$	-0.00297	-0.29682
1.85	$-1.67490270427142 \times 10^{-11}$	-0.00059	-0.58800
1.90	$-4.93772553497656 \times 10^{-11}$	-0.00174	-1.73936
1.95	$-7.54201213279661 \times 10^{-11}$	-0.00265	-2.65481
2.00	$-9.07082335250592 \times 10^{-11}$	-0.00319	-3.19352

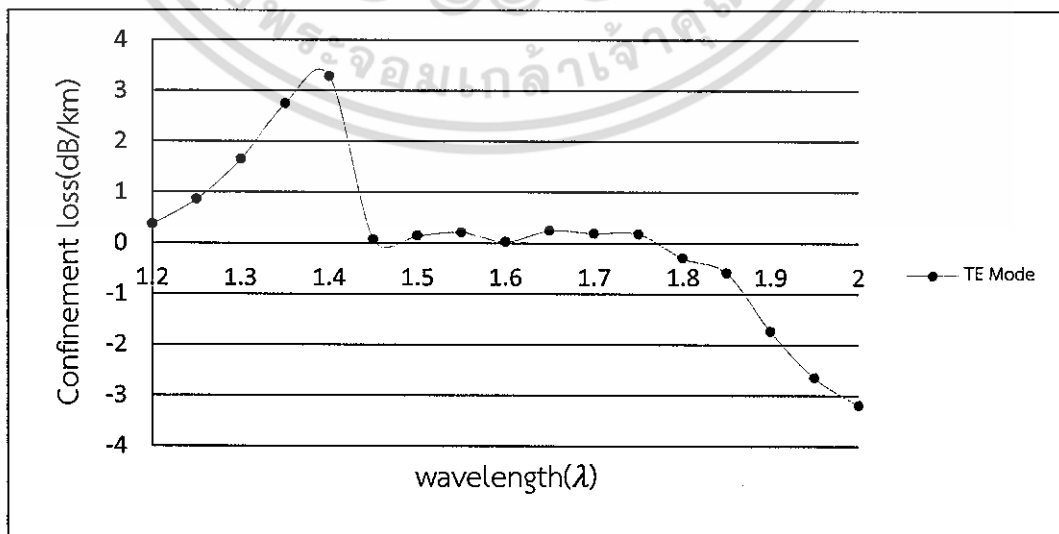


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสง เมื่อ $d=0.3 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลของค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสงในผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ ในโหมด TE ที่ $d=0.5 \mu\text{m}$

Wavelength (μm)	Imaginary part	CL (dB/m)	CL (dB/km)
1.20	$2.5470331845751 \times 10^{-11}$	0.000898	0.897848
1.25	$3.68575483719777 \times 10^{-11}$	0.001299	1.299238
1.30	$5.50297370722941 \times 10^{-11}$	0.001937	1.936534
1.35	$8.44544183554157 \times 10^{-11}$	0.002975	2.975221
1.40	$8.1062284019397 \times 10^{-11}$	0.002856	2.855508
1.45	$6.77967282443579 \times 10^{-12}$	0.000239	0.238722
1.50	$8.44544183554157 \times 10^{-12}$	0.000298	0.297522
1.55	$4.3953336018254 \times 10^{-12}$	0.000155	0.154923
1.60	$8.63929748322651 \times 10^{-13}$	0.000030	0.030421
1.65	$8.44544183554157 \times 10^{-12}$	0.000298	0.297522
1.70	$6.77967282443579 \times 10^{-12}$	0.000239	0.238722
1.75	$5.50297370722941 \times 10^{-12}$	0.000194	0.193653
1.80	$-3.14740329980666 \times 10^{-11}$	-0.00111	-1.10911
1.85	$-6.46839550127761 \times 10^{-11}$	-0.00228	-2.27807
1.90	$-8.62653430460925 \times 10^{-11}$	-0.00304	-3.03860
1.95	$-9.59937118180348 \times 10^{-11}$	-0.00338	-3.37991
2.00	$-9.83334814732594 \times 10^{-11}$	-0.00346	-3.46111

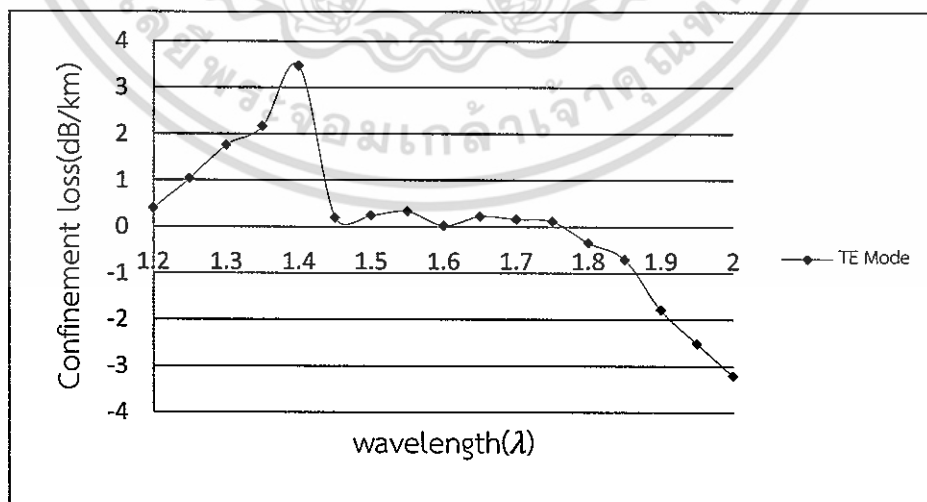


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสง เมื่อ $d=0.5 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

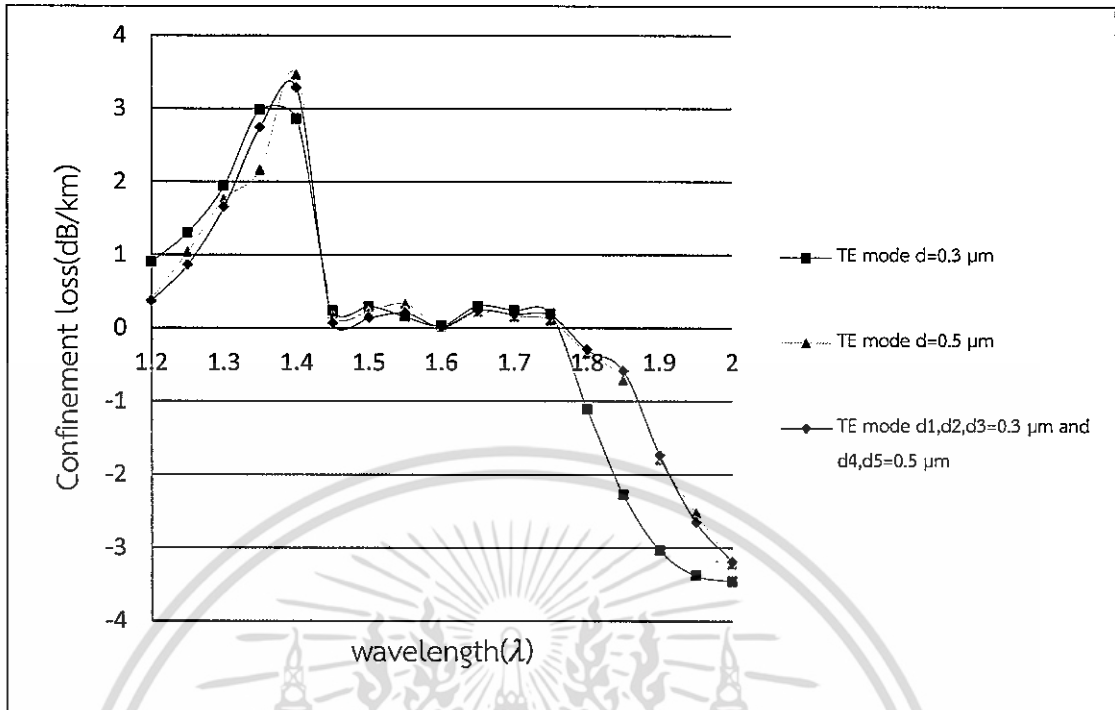
ตารางที่ 4.3 ข้อมูลของค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสงในผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ ในโหมด TE ที่ $d_1, d_2, d_3 = 0.3 \mu\text{m}$ และ $d_4, d_5 = 0.5 \mu\text{m}$

Wavelength (μm)	Imaginary part	CL (dB/m)	CL (dB/km)
1.20	$1.12388626697219 \times 10^{-11}$	0.000394	0.394349
1.25	$2.93840059149171 \times 10^{-11}$	0.001035	1.035166
1.30	$4.98010290620996 \times 10^{-11}$	0.001753	1.753444
1.35	$6.12568400346197 \times 10^{-11}$	0.002158	2.158355
1.40	$9.82584284994562 \times 10^{-11}$	0.003461	3.461115
1.45	$5.41852705294077 \times 10^{-12}$	0.000191	0.190837
1.50	$6.79442045570943 \times 10^{-12}$	0.000239	0.239074
1.55	$9.2831838736915 \times 10^{-12}$	0.000327	0.326746
1.60	$4.7222165794738 \times 10^{-13}$	0.000016	0.016627
1.65	$6.1760536614737 \times 10^{-12}$	0.000218	0.217596
1.70	$4.43705382191957 \times 10^{-12}$	0.000156	0.156331
1.75	$2.9807363807978 \times 10^{-12}$	0.000105	0.104925
1.80	$-9.96989827574268 \times 10^{-11}$	-0.00035	-0.35104
1.85	$-2.02162106480496 \times 10^{-11}$	-0.00071	-0.71124
1.90	$-5.10647606469101 \times 10^{-11}$	-0.0018	-1.79922
1.95	$-7.16742424223472 \times 10^{-11}$	-0.00252	-2.52454
2.00	$-9.14504856161885 \times 10^{-11}$	-0.00322	-3.22169



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสง เมื่อ $d_1, d_2, d_3 = 0.3 \mu\text{m}$ และ $d_4, d_5 = 0.5 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลทั้ง 3 ของโหมด TE

ผลจากตารางที่ 4.1 จะพบว่าเมื่อเราทำการเปลี่ยนขนาดของรูเท่ากับ $0.3 \mu\text{m}$ จะได้ค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสง 0.021011 dB/km ซึ่งแสดงข้อมูลเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.9 จากนั้นทำการเปลี่ยนขนาดของรูเท่ากับ $0.5 \mu\text{m}$ จะได้ผลดังตารางที่ 4.2 โดยค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสงเท่ากับ 0.030421 dB/km โดยแสดงข้อมูลเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.10 และเมื่อทำการเปลี่ยนขนาดของรูอากาศให้แต่ละชั้นแตกต่างกัน จะได้ผลดังตารางที่ 4.3 ซึ่งมีค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสงเท่ากับ 0.016627 dB/km และทำการแสดงผลเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.11 เมื่อทำการแสดงผลเปรียบเทียบผลทั้ง 3 อย่าง จะได้กราฟข้อมูลตามรูปที่ 4.12 ซึ่งจากผลการทดลองเราจะพบว่าเมื่อทำการออกแบบผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ ที่เรียงตัวแบบหกเหลี่ยม โดยเปลี่ยนขนาดของรูอากาศในแต่ละชั้นแตกต่างกันนั้น จะได้ค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสงต่ำที่สุด ส่งผลให้แสงที่ออกมากจากผลึกจะมีความเข้มมากกว่าแบบผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ ที่ทำการเปลี่ยนขนาดรูอากาศเท่ากันหมดทุกชั้น

สรุปผลการจำลองและงานวิจัยในอนาคต

5.1 สรุปผลการจำลอง

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการออกแบบโครงสร้างผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติ โดยทำการศึกษาปรากฏการณ์ทางแสงในผลึกเชิงแสงด้วยวิธี FDTD ซึ่งขั้นตอนแรกจะทำการออกแบบผลึกโฟโตนิกส์แบบ 2 มิติที่เรียกว่าโฮลีย์ไฟเบอร์ โดยจะทำการออกแบบโฮลีย์ไฟเบอร์ที่มี 5 ชั้น จากนั้นทำการกำหนดขนาดของรูอากาศและระยะห่างระหว่างรูของอากาศในค่าที่เหมาะสม เมื่อได้ขนาดของรูอากาศและระยะห่างระหว่างรูอากาศแล้ว ทำการออกแบบขนาดของรูอากาศโดยให้แต่ละวงมีขนาดของรูอากาศที่แตกต่างกัน

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม OptiFDTD โดยเริ่มแรกเราจะทำการ simulation ในส่วนของ FDTD Band solver จากนั้นทำการออกแบบโฮลีย์ไฟเบอร์ที่มีขนาดของรูอากาศที่แตกต่างกันและทำการ simulation แบบ 2 มิติ โดยให้ค่าความยาวคลื่นที่ 1.55 ไมครอน โปรแกรมจะทำการแสดงผลออกมาในรูปแบบของ imaginary part จากนั้นก็จะสามารถคำนวณค่า Confinement loss ได้ เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า confinement loss ที่ทำการเปลี่ยนขนาดของรูอากาศเท่ากันหมดทุกชั้นและค่า confinement loss ที่ทำการเปลี่ยนขนาดของรูอากาศที่แต่ละชั้นแตกต่างกัน จะพบว่าค่า confinement loss ที่ทำการเปลี่ยนขนาดของรูอากาศที่แต่ละชั้นแตกต่างกันนั้นจะมีค่าที่ต่ำกว่าแบบที่ทำการเปลี่ยนขนาดรูอากาศเท่ากันทุกชั้น โดยค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสงนั้นจะมีค่าเท่ากับ 0.016627 ซึ่งถือว่าเป็นค่าการสูญเสียที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับโฮลีย์ไฟเบอร์แบบขนาดของรูอากาศเท่ากันทุกชั้น

5.2 งานวิจัยในอนาคต

จากการทดลองเรื่องการตรวจสอบค่าการสูญเสียในโฮลีย์ไฟเบอร์ชนิดเรียงตัวแบบเหลี่ยม เป็นการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรมทางคณิตศาสตร์ OptiFDTD ซึ่งปัจจุบันโฮลีย์ไฟเบอร์ถือได้ว่าเป็นสิ่งแปลกใหม่และน่าสนใจเป็นอย่างมากเพราะเนื่องจากไฟเบอร์ธรรมดาจะมีข้อบกพร่องที่ค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสงสูง แต่สำหรับโฮลีย์ไฟเบอร์จะมีค่าการสูญเสียที่เกิดจากการกักกันของแสงน้อยมาก โดยปัจจุบันสามารถนำโฮลีย์ไฟเบอร์ไปใช้ในด้านต่างๆมากมาย เช่น ด้านการสื่อสาร optical sensing และ non-linear

เอกสารอ้างอิง

- [1] Shweta Saboo and Chandra Prakash Gupta. "Design of photonic crystal fiber for minimum confinement loss by varying the size of holes," International Journal of Electronics and Communication Engineering (IJECE) ISSN 2278-9901 vol 2, Issue 2, 2013, pp. 89-98.
- [2] Revathi. T. K and K. Sunilkumar. "Investigation on the Confinement Loss of Index-guided Photonic Crystal Fibers in the Visible Spectrum," Optical Networking Technologies and Data Security, 2012, pp. 621-625.
- [3] Amorntep Wichasirikul. "Photonic crystal structure design and simulation for control the single photon generation," Thammasat university, 2010.
- [4] Md. Mahbub Hossain and Md. Maniruzzaman. "Analysis of Dispersion and Confinement Loss in Photonic Crystal Fiber," International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT), 2014.
- [5] Syam Prasad N. Pearson, Divya K. N., Gayathri B. "Design and Analysis of Modified Photonic Crystal Fiber with Low Confinement Loss," International Journal for Scientific Research & Development Vol. 1, Issue 4, 2013.
- [6] Dennis W. Prather, Shouyuan Shi, Ahmed Sharkawy, Janusz Murakowski and Garrett J. Schneider. (2009). Photonic Crystal Theory, Application, and Fabrication. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- [7] Optiwave System Inc. (2009). OptiFDTD: Technical Background and Tutorials. Ottawa: Optiwave Inc.
- [8] F. Poli, A. Cucinotta and S. Selleri. (2007). Photonic Crystal Fibers Properties and Application. The Netherlands: Springer.
- [9] Steven Cooper and Dennis Cain. Electromagnetic waves. Retrieved December 22, 2015. From http://www.srh.noaa.gov/srh/jetstream/remote/remote_intro.html.
- [10] Raymond A. Serway and John W. Jewett. (2014). Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics. (9th ed.). Mary Finch and Charlie Hartford.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

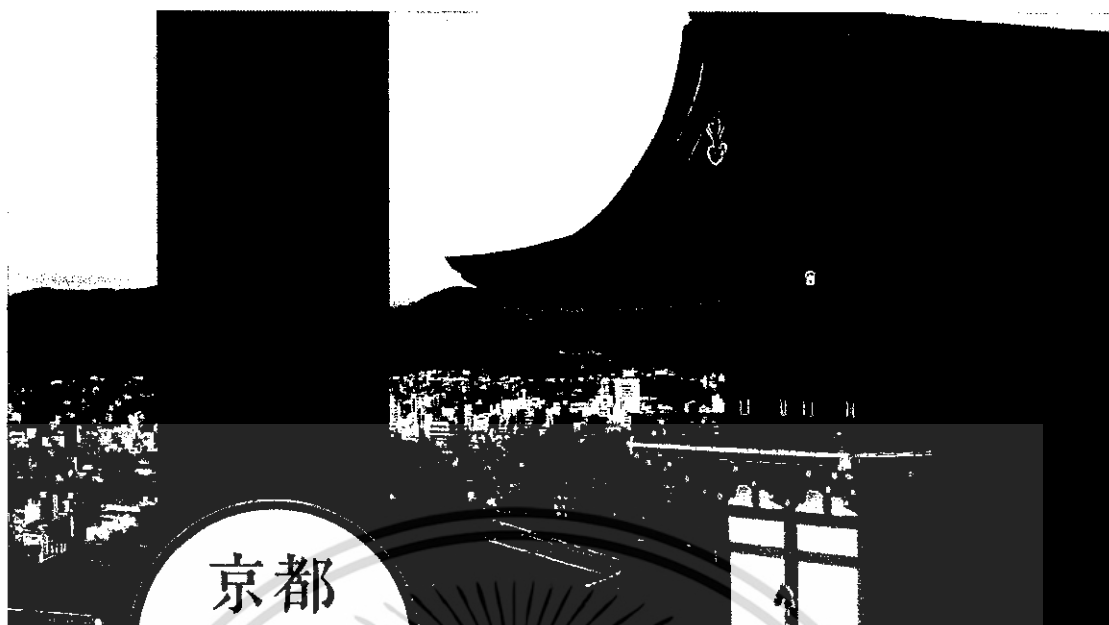
- [11] John D. Joannopoulos, Steven G. Johnson, Joshua N. Winn, and Robert D. Meade. (2008). Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. (second edition). Princeton University Press.
- [12] Igor A. Sukhoivanov, Igor V. Guryev. (2009). Photonic Crystals Physics and Practical Modeling. New York: Springer.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



京都
KYOTO
JAPAN

Conference Proceedings
March 29-31, 2016

ACEAIT

Annual Conference on
Engineering and Information Technology

GLSBE

Global Conference on
Life Science and Biological Engineering

ISFAS

International Symposium on
Fundamental and Applied Sciences

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISFAS-1544

Investigation on Loss of Hexagonal Arrangement in Holey Fiber

D. Chittinan¹, S. Kamoldilok¹, S. Lekchaum¹¹Department of Physics, King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang, Thailand.
E-mail: dchittinandana@gmail.com

Abstract

This paper investigated the confinement loss of hexagonal lattice by structure designed of pitch, shape of holes and air holes size of Large Mode Area (LMA) holey fiber with hexagonal arrangement. it's made from pure silica. By using the OptiFDTD programming based on the finite-difference time-domain (FDTD) method and its wavelength is 1.55 micron, the result of simulation shown that the confinement loss was proportional to changing pitch, shape of holes and air holes size.

Keywords: Holey fiber, photonic crystal fiber, confinement loss, finite difference time domain

Introduction

Photonic crystal fiber (PCF) is optical waveguide of fiber based on the properties of 2-D photonic crystal which a 2-D photonic crystal is periodic along two directions. PCF is an arrangement of air hole and PCF has been used light confinement in hollow core methods to propagate light. PCF is now finding application in fiber optic communication, high power laser and nonlinear devices [1]. Moreover, PCF is also known as holey fiber. Holey Fiber (HF) are microstructures that solid core surrounded by cladding determined by array of air holes and guide light of holey fiber have core and cladding that difference effective refractive index and can be made from single-material typically pure silica by hole which are of a similar size to the wavelength of light when light of different wavelengths can be passed. As a result, Holey fibers have experienced loss of less than conventional fibers.

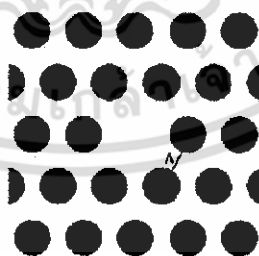


Fig. 1. Structure of holey fiber in hexagonal arrangement

Holey fiber is defined by parameter Λ is the lattice period, r is radius of air hole and d is diameter of air hole. As shown in Fig.1

In this paper we studied confinement loss in five rings hexagonal arrangement holey fiber by varying the pitch, shape of holes and air holes size. In addition, the solid core was designed and the simulated used the OptiFDTD programing based on the finite-difference time-domain (FDTD) method by changed difference diameter of the hole and pitch in the PCF which comparative to achieve very low confinement loss by evaluated for TE and TM of holes core.

Analysis method and modelling of 2-D photonic crystal fiber

Light is an electromagnetic wave which can be described by the following the Maxwell's equations and electromagnetic theory is summarized in the following mathematical equation. The general equations in partial differential equation are given by[2]

$$\nabla \cdot D = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} \quad (4)$$

Where, E is the electric field and H is the magnetic field, respectively. The electric and magnetic fields are associated: $D = \epsilon E$ and $B = \mu H$, where ϵ is the dielectric permittivity and μ is the magnetic permeability. Then, the wave equation for E and H can be presented at the following:

$$\nabla^2 E = \epsilon \mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (5)$$

$$\nabla^2 H = \epsilon \mu \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \quad (6)$$

Therefore, the electric and magnetic fields of a mode can be written as follows

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-j(\lambda z - \omega t)} \quad (7)$$

and

$$\vec{H} = \vec{H}_0 e^{-j(\lambda z - \omega t)} \quad (8)$$

Where \vec{E} and \vec{H} are the mode field profiles, ω is the angular frequency of the wave, λ is the wavelength of light, then $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ is propagation constant.

We consider the fraction of PCF. The refractive index have been taken to be $n=1.46$, wavelength $\lambda=1.55\mu\text{m}$, pitch to $2.0\mu\text{m}$. The diameter in the PCF is varied in which $d=0.5\mu\text{m}$ when normalized hole diameter is equal to $0.25\mu\text{m}$, as shown in the structural of five rings hexagonal in Fig. 2.

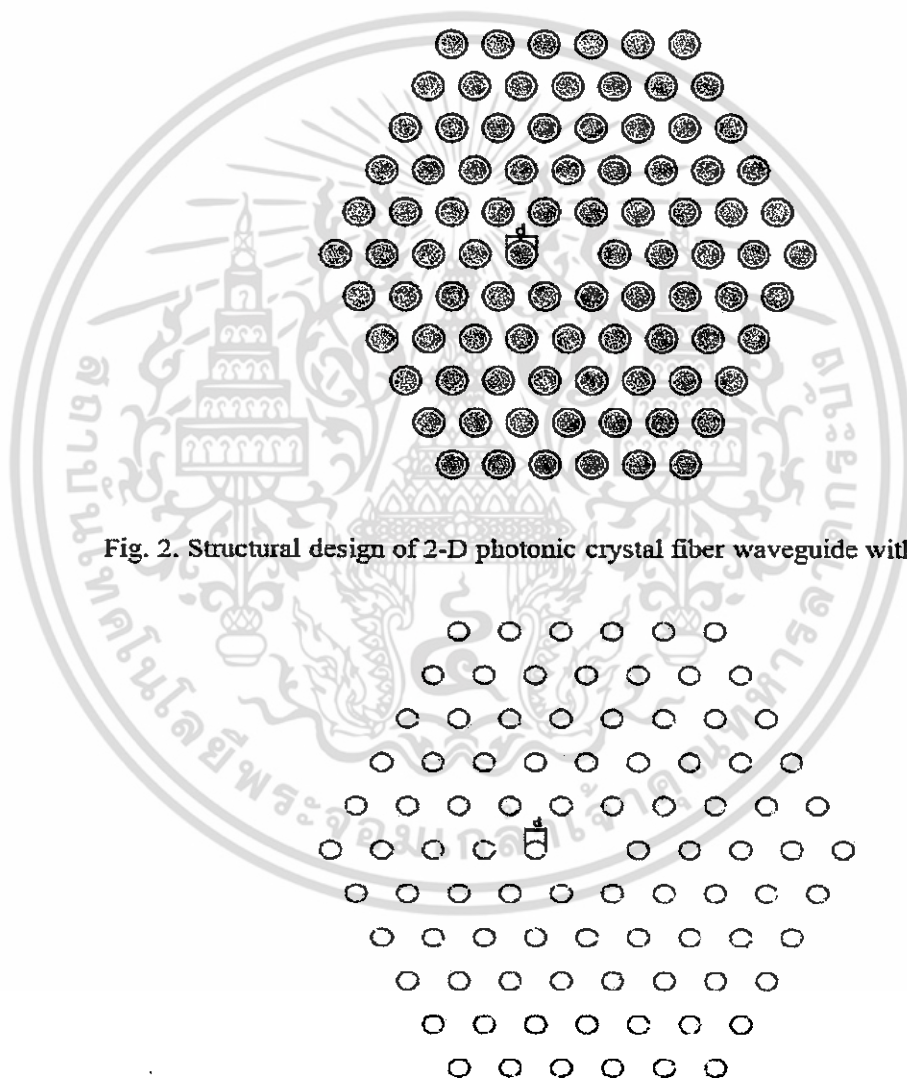


Fig. 2. Structural design of 2-D photonic crystal fiber waveguide with $d=0.5\mu\text{m}$.

Fig. 3. Structural design of 2-D photonic crystal fiber waveguide with $d=0.3\mu\text{m}$.

In figure 3. We have changed the normalized hole diameter in the PCF. The normalized hole diameter is varied equal to 0.15 μm .

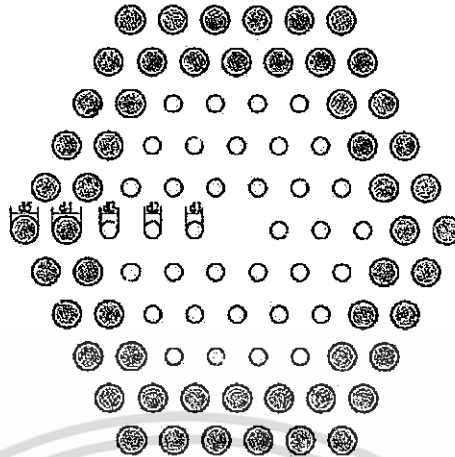


Fig. 4. Structural design of 2-D photonic crystal fiber waveguide with $d_1, d_2, d_3 = 0.3 \mu\text{m}$ and $d_4, d_5 = 0.5 \mu\text{m}$

In figure 4. We have again changed the normalized hole diameter of inside 3-layer in the PCF. The normalized hole diameter of 3-layer is varied equal to 0.15 μm and outer 2-layer equal to 0.25 μm . Then, we have calculated confinement loss. The confinement loss was calculated from the imaginary part (Im), using the following equation: [3]

$$CL = \frac{20}{\ln(10)} k_0 \text{Im}(n_{\text{eff}}) = 8.686 k_0 \text{Im}(n_{\text{eff}})$$

Where, CL is confinement loss, k_0 is the propagation constant, $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ is the imaginary part of effective refractive index.

After simulation by using OptiFDTD programming we have found the lowest confinement loss is 0.016627 dB/km. Then, we have plotted confinement loss, as shown in Fig. 5.

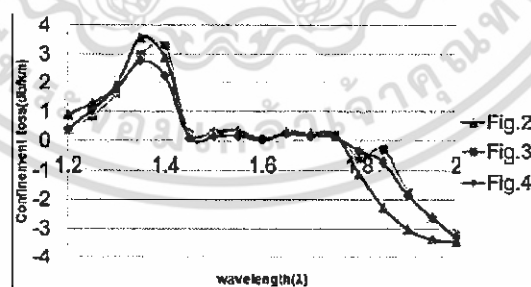


Fig. 5. Confinement loss for five rings hexagonal PCF

Conclusion

In this paper, we have proposed the design waveguide of fibers. The normalized hole diameter and pitch is varied by analyzed confinement loss. The result shows that the comparative between the normalized hole diameter in 5-layer balanced and the normalized diameter in various layers of hexagonal different, we have been found when the diameter of inside 3-layer and outer 2-layer is changed to low confinement loss. The proposed PCF is useful for the applications in non-linear, bio-sensing, optical sensing, display devices, communication systems, etc.

References

1. Jeong I. Kim: Analysis and Applications of Microstructure and Holey Optical Fibers, Ph.D Thesis Virginia Polytechnic Institute and State University. 2003:105-118.
2. Jackson J. D. Classical electrodynamics 3rd edition. 1999; 2-3.
3. Poli F, Cucinotta A, and Selleri S: Photonic crystal fibers Properties and applications. 2007;223.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวदनยวรรณ จิตตินันท์
วัน/เดือน/ปีเกิด	17 กุมภาพันธ์ 2535
ที่อยู่ปัจจุบัน	315 หมู่ 5 ซอยศิริรัตน์ ถนนปานคุณ ตำบลโพธิ์ชัย อำเภอเมือง จังหวัดหนองคาย 43000
ประวัติการศึกษา	(2553-2556) วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร (2550-2552) มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนปทุมเทพวิทยาคาร หนองคาย
ผลงานวิชาการ	The 4 th International Symposium on Fundamental and Applied Sciences (ISFAS) ระหว่างวันที่ 29-31 มีนาคม 2559 ณ เมืองเกียวโต ประเทศญี่ปุ่น
ทุนการศึกษา	(2557-ปัจจุบัน) ทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปีภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้