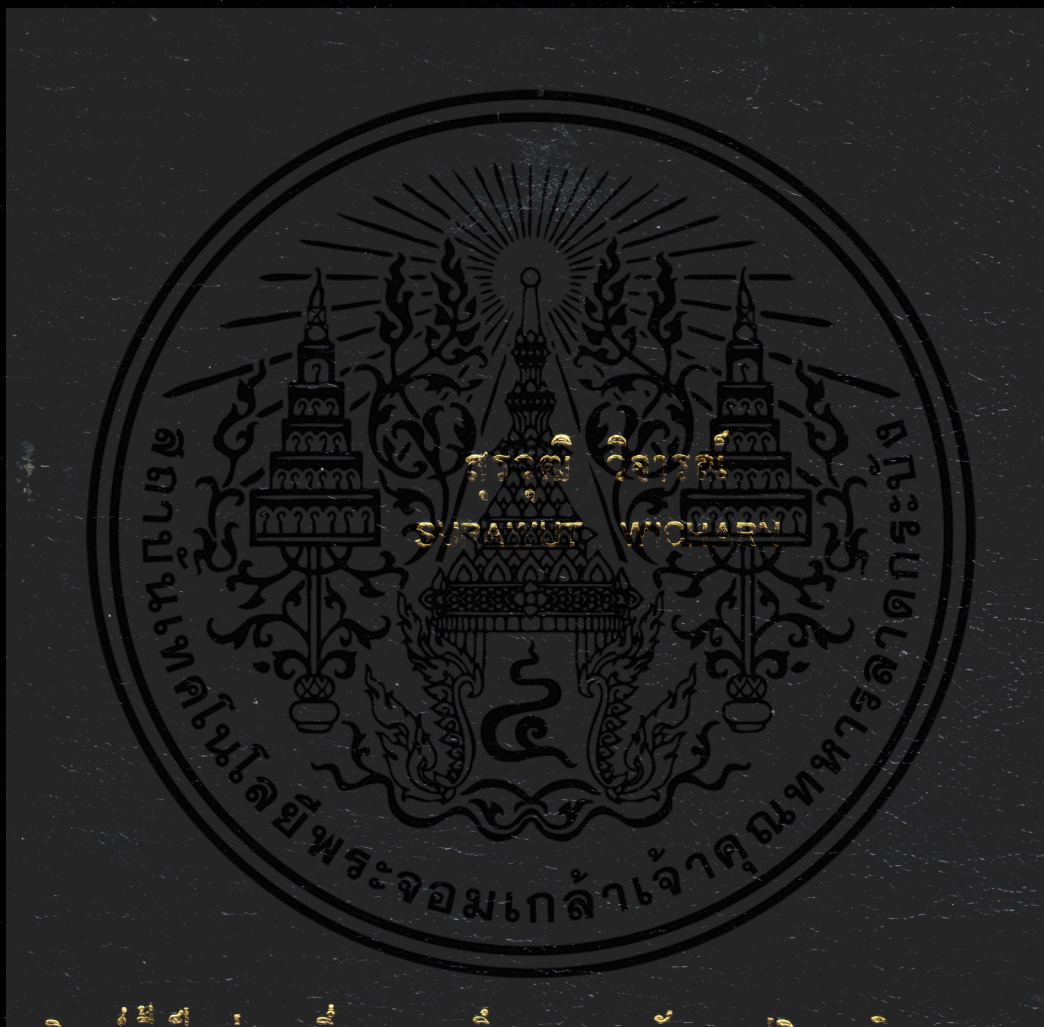


การสร้างแบบจำลองโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก
ด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน

METALLO-DIELECTRIC PHOTONIC BAND GAP STRUCTURE
SIMULATION USING TRANSFER MATRIX METHOD



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยทางเทคโนโลยีสารสนเทศของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

KMITL-2010-SC-M-030-016

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสร้างแบบจำลองโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก
ด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน

**METALLO-DIELECTRIC PHOTONIC BAND GAP STRUCTURE
SIMULATION USING TRANSFER MATRIX METHOD**



T110576



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **110576**
วัน,เดือน,ปี - 9 มี.ย. 2553

b. 122.57394
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2553

KMITL-2010-SC-M-030-016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**METALLO-DIELECTRIC PHOTONIC BAND GAP STRUCTURE
SIMULATION USING TRANSFER MATRIX METHOD**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2010**

KMITL-2010-SC-M-030-016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2010

FACULTY OF SCIENCE





KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนเวสสำหรับกรใชงนเพื่กรศกษเทอนน เมอนฐนตเทนหนไปใชประโยชนด้นกรค้
ไม่วกรณใดทงสิ้น อิกทงห้มมิให้ดตเปลงเนือห และตองอ้งอิงถึงเจ้ขงเอกรสรทกครั้งที่มีกรน้ไปใช

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสร้างแบบจำลองโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน
Metallo-Dielectric Photonic Band Gap Structure Simulation using Transfer Matrix Method

นักศึกษา นายสุรวุฒิ วิจารณ์
รหัสประจำตัว 51067302
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.ประชาน บุรณศิริ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ดร.วรการ นียากร	
ดร.ประชาน บุรณศิริ	
ผศ.ดร.นราธิป วิทยากร	
ดร.สืบตระกูล สุชาติ	

KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 30 เมษายน พ.ศ. 2553 เวลา 13.00 น.

สถานที่สอบ ณ ห้อง 307 ชั้น 3 อาคารจุฬารามวลัยลักษณ์ 1

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.คุณณี ธนะบริพัตน์)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 10 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 53

สำนักทะเบียนและประมวลผล สจล.

วันที่ส่งเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

วันที่ 26 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2553

ลงชื่อ.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
แม้ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากผู้ใดฝ่าฝืนมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสร้างแบบจำลอง โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน

นักศึกษา นายสุรวุฒิ วิจารณ์

รหัสประจำตัว 51067302

ปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

พ.ศ. 2553

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.ประธาน บุรณศิริ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาสมบัติการส่งผ่านเชิงทฤษฎีของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกซึ่งเป็น โครงสร้างที่เกิดจากการเรียงตัวสลับกันอย่างเป็นคาบของชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์และเงินซึ่งมีค่าดัชนีหักเหสูงและต่ำตามลำดับ โดยเลือกใช้ระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอนเป็นเครื่องมือในการศึกษา ในการศึกษาเบื้องต้นพบว่าค่าการสะท้อนและการส่งผ่านของ โครงสร้างชนิดนี้ขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นเงินและซิลิกอน ไดออกไซด์, มุมตกกระทบของแสง, จำนวนคาบของโครงสร้าง และชนิดวัสดุของฐานรอง ต่อมาเมื่อเพิ่มชั้นบกร่อง ซึ่งเป็นซิลิกอน ไดออกไซด์ที่มีความหนามากกว่าชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์อื่นๆภายใน โครงสร้างนี้พบว่าความเป็นคาบของโครงสร้างถูกทำลายไปส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า photon localization ขึ้นภายในชั้นบกร่องและจากการสังเกตปรากฏการณ์ดังกล่าวพบว่าแสงเกิดการกระเจิงและแทรกสอดกันภายในชั้นดังกล่าวเกิดเป็นค่าการส่งผ่านสูงสุดของแสงที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกับศูนย์กลางของแถบช่องว่างทางแสงและความกว้างของค่าการส่งผ่านสูงสุดนี้มีค่าใกล้เคียงความยาวคลื่นเดี่ยวนมาก ดังนั้นจากผลการคำนวณดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเติมชั้นบกร่องแก่โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกสามารถถูกใช้เป็น โพรงำทอนของเลเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำซึ่งให้แสงเลเซอร์เอท์พุทที่มีคุณสมบัติความเป็น โคฮีเรนต์สูงขึ้น

Thesis Title	Metallo-Dielectric Photonic Band Gap Structure Simulation using Transfer Matrix Method
Student	Surawut Wicharn
Student ID	51067302
Degree	Master of Science
Program	Applied Physics
Year	2010
Thesis Advisor	Dr. Prathan Buranasiri

ABSTRACT

In this study, we have been theoretically investigated the transmission properties of one dimensional, metallo-dielectric photonic band gap (MD-PBG) structure that consist of a stack in between alternating layers of silicon dioxide and silver material, such that the complex refractive index alternates between a high and low value. In this project, the transfer matrix method (TMM) has been used as the numerical tool. First we found the reflectance and transmittance properties are depend on the silver and silicon dioxide thickness, incident angle, number of periodic and type of substrate. Then by adding the defect say a stack of silicon dioxide, which is larger than the others that used in this periodic structure, the periodical property of the MD-PBG structure has been damaged, which results the photon localization observed in the perturb piece due to the multiple scattering and interference of light. In addition, a sharp transmission peak of light at near center of the band gap has been observed. The result shows that the defect state of MD-PBG structure may be used as the cavity of semiconductor laser for improving its coherence.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำจากอาจารย์และนักวิชาการหลายท่าน เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงหรือผลึกโฟโตนิกส์ในเชิงทฤษฎีซึ่งเป็นปัญหาที่ซับซ้อนอย่างยิ่ง จึงจำเป็นต้องมีการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างชนิดนี้ การดำเนินงานทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีนั้น ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ดร.ประธาน บุรณศิริ ศ.โจเซฟ เฮาส์ และอ.ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง สำหรับคำแนะนำเกี่ยวกับทฤษฎีของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงและแนวทางในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับคำนวณสมบัติการส่งผ่านของโครงสร้างชนิดนี้ ขอขอบคุณ ดร.วรการ นียากร ผศ.ดร.นราธิป วิทยากร และดร.สืบตระกูล สุชาติ ประธานกรรมการและกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ สำหรับคำแนะนำในการดำเนินงานวิจัย การจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์และคอยแนะนำข้อมูลที่มีประโยชน์ ขอขอบคุณอาจารย์พดล ดาวดวง อาจารย์ผู้สอนวิชาฟิสิกส์โรงเรียนสุวรรณศรอนันต์ วิทยา ผู้เป็นแรงบันดาลใจและช่วยสั่งสอนความรู้ทางด้านฟิสิกส์แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนากำลังคนทางด้านวิทยาศาสตร์ (ทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย) สำหรับทุนการศึกษา งบประมาณในการดำเนินงานวิจัยและการสนับสนุนในการนำวิทยานิพนธ์ไปเสนอในงานประชุมวิชาการ

ขอขอบคุณหน่วยงานบัณฑิตศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังสำหรับการสนับสนุนและอำนวยความสะดวกในงานเอกสารด้านต่างๆ

ขอขอบคุณบิดา-มารดาและสมาชิกในครอบครัวของข้าพเจ้าทุกคนที่ให้การสนับสนุนในการเรียนต่อระดับบัณฑิตศึกษาและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ศรวุฒิ วิจารณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 แสง.....	4
2.2 นาโนโฟโตนิกส์.....	5
2.3 โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง.....	6
2.4 การคำนวณที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง.....	7
2.4.1 การสะท้อนและหักเหของคลื่นระนาบบริเวณรอยต่อตัวกลางสองชนิด.....	7
2.4.1.1 การสะท้อนและส่งผ่านของคลื่นโพลาไรซ์แบบ s	10
2.4.1.2 การสะท้อนและส่งผ่านของคลื่นโพลาไรซ์แบบ p	11
2.4.1.3 ค่าการสะท้อนและส่งผ่าน.....	12
2.4.2 ระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอนสำหรับ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง.....	13
2.4.3 ค่าการสะท้อนและส่งผ่านสำหรับ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง.....	17
2.5 สถานะบัพพร้อมของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง.....	19
2.5.1 สถานะบัพพร้อมของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบ 1 มิติ.....	21
2.5.2 ระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอนของ โครงสร้างที่มีการเติมชั้นข้อบกพร่อง.....	22
2.5.3 ค่าการสะท้อนและค่าการส่งผ่านสำหรับ โครงสร้างที่มีการเติมชั้นข้อบกพร่อง.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก.....	24
2.6.1 ทศนศาสตร์ของโลหะ.....	25
2.6.1.1 สกินเดปท์.....	25
2.6.1.2 ค่าครรรชนีหักเหเชิงซ้อนของโลหะ.....	26
2.6.2 ค่าการสะท้อนและส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบ เมทัลโล-ไดอิเล็กทริก.....	27
2.6.3 สถานะบกพร่องของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล- ไดอิเล็กทริก.....	28
2.7 เลเซอร์สารกึ่งตัวนำแบบ DFB.....	28
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	31
3.1 การออกแบบโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก.....	31
3.1.1 การคำนวณหาความหนาของชั้น ไดอิเล็กทริก.....	31
3.1.2 การคำนวณหาความหนาของชั้นโลหะ.....	31
3.2 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณค่าการส่งผ่านของ โครงสร้างแถบช่องว่าง ทางแสงแบบเมทัล โล-ไดอิเล็กทริก.....	32
3.3 ขั้นตอนการศึกษาการเปรียบเทียบผลการคำนวณของ โปรแกรมที่ออกแบบกับงานวิจัย ที่ผ่านมา.....	34
3.4 ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการส่งผ่านของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัล โล- ไดอิเล็กทริก.....	34
3.4.1 ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการส่งผ่านเมื่อความหนาของชั้นซิลิกอนออกไซด์ มีค่าต่างๆ.....	35
3.4.2 ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการส่งผ่านเมื่อความหนาของเงินมีค่าต่างๆ.....	35
3.4.3 ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการส่งผ่านเมื่อมุมตกกระทบของแสงมีค่าต่างๆ	35
3.4.4 ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการส่งผ่านเมื่อจำนวนคาบของ โครงสร้างมีค่าต่างๆ	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.5	ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการส่งผ่านเมื่อชนิดวัสดุของฐานรองโครงสร้างต่างกัน.....	36
3.5	ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการส่งผ่านเมื่อค้ำนึ่งถึงชั้นอากาศระหว่างรอยต่อโลหะ-สารไดอิเล็กทริก.....	36
3.6	โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณค่าการส่งผ่านของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัล โล-ไดอิเล็กทริก.....	39
3.7	ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการส่งผ่านของสถานะบัพพร้อมของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัล โล-ไดอิเล็กทริก.....	41
3.7.1	ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการส่งผ่าน ในกรณีที่มีความหนาของชั้นบัพพร้อมมีค่าต่างๆ.....	41
3.7.2	ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการส่งผ่าน ในกรณีที่มีข้อบกพร่องต่างชนิดกัน.....	41
3.7.3	ขั้นตอนการศึกษาค่าการส่งผ่านในกรณีที่มีจำนวนคาบของ โครงสร้างแตกต่างกัน.....	42
บทที่ 4	ผลการคำนวณ.....	43
4.1	การเปรียบเทียบผลการคำนวณของ โปรแกรมที่ออกแบบกับงานวิจัยที่ผ่านมา.....	43
4.1.1	ผลการคำนวณของ โครงสร้างเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกแบบที่ 1.....	45
4.1.2	ผลการคำนวณของ โครงสร้างเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกแบบที่ 1A.....	46
4.1.3	ผลการคำนวณของ โครงสร้างเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกแบบที่ 2.....	47
4.1.4	ผลการคำนวณของ โครงสร้างเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกแบบที่ 2A.....	48
4.1.5	ผลการคำนวณของ โครงสร้างเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกแบบที่ 3.....	49
4.2	สมบัติการส่งผ่านของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัล โล-ไดอิเล็กทริก.....	51
4.2.1	ผลกระทบจากความหนาของชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์.....	51
4.2.2	ผลกระทบจากความหนาของชั้นเงิน.....	54
4.2.3	ผลกระทบจากมุมตกกระทบของแสง.....	58
4.2.4	ผลกระทบจากจำนวนคาบของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง.....	61
4.2.5	ผลกระทบจากชนิดของวัสดุของฐานรอง.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 สมบัติการส่งผ่านเมื่อคำนึงถึงชั้นอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อโลหะ-ไดอิเล็กทริก	67
4.4 สมบัติการส่งผ่านของสถานะบัพพร้อมของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบ เมทัลโล-ไดอิเล็กทริก	68
4.4.1 สมบัติการส่งผ่านของสถานะบัพพร้อมของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง ที่ขอบบัพพร้อมมีความหนาแตกต่างกัน	68
4.4.2 สมบัติการส่งผ่านของสถานะบัพพร้อมของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง ที่มีชนิดของขอบบัพพร้อมต่างกัน	69
4.4.3 สมบัติการส่งผ่านของสถานะบัพพร้อมของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง ที่มีจำนวนคาบของ โครงสร้างแตกต่างกัน	70
4.5 การประยุกต์ใช้สถานะบัพพร้อมของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล- ไดอิเล็กทริกเป็น โครงสร้างเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ	71
บทที่ 5 สรุปผลการคำนวณ	76
5.1 สรุปผลการคำนวณ	76
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	78
เอกสารอ้างอิง	79
ภาคผนวก	81
ภาคผนวก ก. โปรแกรมคำนวณสมบัติการส่งผ่านด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน	82
ภาคผนวก ข. งานวิจัยที่ได้เข้าร่วมนำเสนอในการประชุมวิชาการระดับชาติ	92
ประวัติผู้เขียน	103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางแสดงค่าครรชนีหักเหเชิงซ้อนของโลหะชนิดต่างๆ.....	27
4.1 ตารางแสดงความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (d_1) และเงิน (d_2) ภายในโครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่นำมาอ้างอิง.....	43
4.2 ตารางแสดงผลค่าตำแหน่งศูนย์กลางของแถบช่องว่างทางแสงสำหรับค่าความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ต่างๆ.....	54
4.3 ตารางแสดงค่าครรชนีหักเหของวัสดุชนิดต่างๆที่ถูกเลือกมาใช้เป็นฐานรอง.....	66
4.4 ตารางแสดงขนาดแบนด์วิธและค่าการส่งผ่านของเลเซอร์เอทท์พุทของโครงสร้างที่มีจำนวนคาบต่างกัน.....	74
4.5 ตารางแสดงอัตราขยายเชิงแสงขีดเริ่มของโครงสร้างที่มีจำนวนคาบต่างกัน.....	74



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านต่างๆ..... 4
2.2 (ก)	โครงสร้างโฟโตนิกแบนด์แกปที่เกิดจากการจัดเรียงอย่างเป็นคาบของฟิล์มบาง
(ข)	โครงสร้างโฟโตนิกแบนด์แกปที่เกิดจากการจัดเรียงตัวเองของอนุภาคคอลลอยด์..... 5
2.3	แสดงลักษณะโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบ 1 มิติ แบบ 2 มิติ และแบบ 3 มิติ..... 6
2.4	แสดงคลื่นตกกระทบ, คลื่นสะท้อน และคลื่นส่งผ่านที่ระนาบคกกระทบใดๆ..... 7
2.5	แสดงการสะท้อนและการหักเหของคลื่นที่มีทิศทางโพลาไรซ์แบบ s (โหมด TE) และแบบ p (โหมด TM)..... 9
2.6	โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงที่เกิดจากชั้นสารไดอิเล็กทริกที่มีครรชนีหักเหเท่ากับ n_1 และ n_2 โดยถูกจัดวางตามแนวแกน z 13
2.7	โครงสร้างแบบเป็นคาบที่ถูกออกแบบให้มีคุณสมบัติเป็นกระจกแบบแบรค..... 17
2.8	ลักษณะของข้อบกพร่องภายในโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงชนิด 1 มิติ, 2 มิติ และ 3 มิติ..... 19
2.9 (ก)	ความหนาแน่นของโหมดความถี่สูงภายในแถบช่องว่างทางแสงซึ่งเกิดจากการเพิ่มข้อบกพร่องที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูงกว่าในโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง
(ข)	ความหนาแน่นของโหมดความถี่ต่ำภายในแถบช่องว่างทางแสงซึ่งเกิดจากการเพิ่มข้อบกพร่องที่มีค่าไดอิเล็กทริกต่ำกว่าในโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง..... 20
2.10	สถานะบัพพร้อมของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบ 1 มิติ..... 21
2.11	โครงสร้างของเลเซอร์แบบ DFB..... 28
2.12	สเปกตรัมการเกิดเลเซอร์ของโครงสร้าง DFB ที่มีอัตราขยายที่แตกต่างกัน..... 30
3.1	ลักษณะโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกที่ถูกออกแบบ..... 32
3.2	แผนผังการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่คำนวณด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน..... 33
3.3	ลักษณะโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกที่มีชั้นอากาศแทรกอยู่ระหว่างรอยต่อโลหะกับสารไดอิเล็กทริก..... 37
3.4	ลักษณะสถานะบัพพร้อมของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัล โล-ไดอิเล็กทริก..... 39
3.5	แผนผังการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่คำนวณด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ส่งผ่านสำหรับโครงสร้างที่มีการเติมชั้นข้อบกพร่อง..... 40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ลักษณะโครงสร้างเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกที่ใช้ในการทดสอบความถูกต้องของ โปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	44
4.2 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านของ โครงสร้างเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกแบบที่ 1 จากการทดลอง [21] และจากผลการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	45
4.3 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านของ โครงสร้างเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกแบบที่ 1A จากการทดลอง [21] และจากผลการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	46
4.4 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านของ โครงสร้างเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกแบบที่ 2 จากการทดลอง [21] และจากผลการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	47
4.5 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านของ โครงสร้างเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกแบบที่ 2A จากการทดลอง [21] และจากผลการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	48
4.6 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านของ โครงสร้างเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกแบบที่ 3 จากการทดลอง [21] และจากผลการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	49
4.7 สเปกตรัมการส่งผ่านของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกที่มี ความหนาของชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์เท่ากับ 102.74 นาโนเมตร.....	51
4.8 สเปกตรัมการส่งผ่านของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกที่มี ความหนาของชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์เท่ากับ 136.99 นาโนเมตร.....	52
4.9 สเปกตรัมการส่งผ่านของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกที่มี ความหนาของชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์เท่ากับ 171.23 นาโนเมตร.....	52
4.10 สเปกตรัมการส่งผ่านของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกที่มี ความหนาของชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์เท่ากับ 205.48 นาโนเมตร.....	53
4.11 สเปกตรัมการส่งผ่านของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกที่มี ความหนาของชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์เท่ากับ 239.73 นาโนเมตร.....	53
4.12 สเปกตรัมการส่งผ่านของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกที่มี ความหนาของชั้นเงินเท่ากับ 5 นาโนเมตร.....	55
4.13 สเปกตรัมการส่งผ่านของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกที่มี ความหนาของชั้นเงินเท่ากับ 10 นาโนเมตร.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกที่มีความหนาของชั้นเงินเท่ากับ 15 นาโนเมตร.....	56
4.15 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกที่มีความหนาของชั้นเงินเท่ากับ 20 นาโนเมตร.....	56
4.16 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกที่มีความหนาของชั้นเงินเท่ากับ 25 นาโนเมตร.....	57
4.17 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกกรณีที่มีมุมตกกระทบของแสงเท่ากับ 0 องศา.....	58
4.18 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกกรณีที่มีมุมตกกระทบของแสงเท่ากับ 30 องศา.....	59
4.19 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกกรณีที่มีมุมตกกระทบของแสงเท่ากับ 45 องศา.....	59
4.20 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกกรณีที่มีมุมตกกระทบของแสงเท่ากับ 60 องศา.....	60
4.21 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกกรณีที่โครงสร้างแบบเป็นคาบนี้มีจำนวนคาบเท่ากับ 5.....	61
4.22 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกกรณีที่โครงสร้างแบบเป็นคาบนี้มีจำนวนคาบเท่ากับ 10.....	62
4.23 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกกรณีที่โครงสร้างแบบเป็นคาบนี้มีจำนวนคาบเท่ากับ 15.....	62
4.24 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกกรณีที่โครงสร้างแบบเป็นคาบนี้มีจำนวนคาบเท่ากับ 20.....	63
4.25 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกที่มีฐานรองเป็นอากาศ.....	64
4.26 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกที่มีฐานรองเป็นควอตซ์.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่มีฐานรองเป็นอะลูมินา.....	65
4.28 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่มีฐานรองเป็นซิลิกอน.....	66
4.29 สเปกตรัมการส่งผ่านในกรณีที่กำลังถึงชั้นอากาศที่แทรกอยู่ระหว่างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์กับเงินที่มีความหนาเป็น 0, 5, 10, 15 และ 20 นาโนเมตรตามลำดับ.....	67
4.30 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างที่ขั้วบกร่องมีความหนาต่างกัน.....	68
4.31 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างที่มีขั้วบกร่องต่างชนิดกัน.....	69
4.32 สเปกตรัมการส่งผ่านของโหมคขั้วบกร่องของโครงสร้างที่มีจำนวนคาบต่างกัน.....	70
4.33 สเปกตรัมการสะท้อนของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่มีจำนวนคาบต่างกัน.....	71
4.34 ลักษณะโครงสร้างเลเซอร์สารกึ่งตัวนำแบบฟารี-เพโรต์ (ซ้าย) และสถานะบกร่องของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก (ขวา).....	72
4.35 เลเซอร์เอาท์พุทจากสถานะบกร่องของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก.....	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

นาโนเทคโนโลยีเป็นความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่เกี่ยวข้องกับการลดขนาดของวัตถุให้อยู่ในระดับนาโนเมตรเพื่อให้ได้สมบัติใหม่และควบคุมสมบัติทางกายภาพของวัตถุไม่ว่าจะเป็นสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงอิเล็กทรอนิกส์ และสมบัติเชิงแสง ให้เป็นไปตามความต้องการของผู้ใช้งาน แต่แลกด้วยค่าใช้จ่ายที่สูงในการประดิษฐ์อุปกรณ์ในระดับนี้ขึ้นมาใช้งาน นาโนโฟโตนิกส์ (Nanophotonics) เป็นสาขาย่อยของวิทยาการนาโนเทคโนโลยี และอุปกรณ์ทางด้านนาโนโฟโตนิกส์ชนิดหนึ่งมีพื้นฐานจากโครงสร้างทางแสงที่เรียกว่า โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง (Photonic Band Gap structure) ซึ่งเป็นโครงสร้างทางแสงที่มีความสามารถในการควบคุมสมบัติพื้นฐานต่างๆของแสง เพื่อนำไปสู่การประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ โดยความสามารถในการควบคุมแสงของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงเกิดจากสมบัติความเป็นคาบของครรชนีหักเหหรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของโครงสร้าง ซึ่งเมื่อมีแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาตกกระทบกับ โครงสร้างนี้แล้วพบว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นถูกสะท้อนออกไปหรือไม่สามารถส่งผ่าน โครงสร้างชนิดนี้ได้ซึ่งช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวถูกเรียกว่า แถบช่องว่างทางแสง (Photonic Band Gap) โดยขนาดของแถบช่องว่างนี้มีค่าขึ้นอยู่กับความแตกต่างของค่าครรชนีหักเหของสาร ไดอิเล็กทริกที่เลือกใช้ สำหรับการออกแบบ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงนั้นขนาดของโครงสร้างต้องมีขนาดใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของย่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่นำมาใช้งาน เช่น ต้องการการออกแบบ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงเพื่อใช้งานร่วมกับคลื่น ไมโครเวฟ ดังนั้นขนาดของโครงสร้างจึงต้องอยู่ในระดับมิลลิเมตร เป็นต้น [1 - 2]

การศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงที่ผ่านมา วัสดุที่นำมาประดิษฐ์มักเลือกใช้สารไดอิเล็กทริกสองชนิดที่มีค่าครรชนีหักเหที่แตกต่างกันเพื่อให้เกิดฟังก์ชันคาบภายใน โครงสร้างดังกล่าว ต่อมาจึงได้มีแนวความคิดในการนำวัสดุชนิดอื่นเข้ามาแทนที่สาร ไดอิเล็กทริก เพื่อปรับปรุงสมบัติของ โครงสร้างให้เป็นไปตามความต้องการของผู้ใช้งาน อย่างในปัจจุบันได้มีการนำสารอินทรีย์และวัสดุพอลิเมอร์มาประดิษฐ์เป็น โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง [3] สำหรับใช้งานส่วนประกอบของ โครงสร้างเลเซอร์ นอกจากนี้วัสดุดังกล่าวแล้ววัสดุตระกูล โลหะก็เป็นที่ยอมรับในการนำมาทดแทนสาร ไดอิเล็กทริกเพื่อประดิษฐ์เป็น โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง โดย โครงสร้างชนิดใหม่ถูกเรียกว่า โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก (Metallo-Dielectric Photonic Band Gap structure) [4 - 5], [8 - 9] เนื่องจากโลหะมีค่าการสะท้อนที่สูงเมื่อ

เทียบกับสารไดอิเล็กทริก ส่งผลให้ขนาดของแถบช่องว่างทางแสงสำหรับโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกจึงมีขนาดกว้างกว่าโครงสร้างจากสารไดอิเล็กทริกทั่วไป ในระยะแรกโครงสร้างชนิดนี้มักถูกนำมาใช้งานกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านไมโครเวฟเนื่องจากข้อจำกัดในการประดิษฐ์โครงสร้าง แต่สำหรับปัจจุบันด้วยการมีเทคโนโลยีการประดิษฐ์ในระดับนาโนเมตรขึ้น โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกจึงสามารถถูกสร้างขึ้นมาใช้งานร่วมกับความยาวคลื่นในย่านคลื่นแสงได้

เนื่องจากการประดิษฐ์โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกขึ้นมาใช้งานจริงจำเป็นต้องมีค่าใช้จ่ายที่สูงเช่นเดียวกับที่กล่าวข้างต้น ดังนั้นเพื่อลดความผิดพลาดจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาเชิงทฤษฎีสำหรับโครงสร้างชนิดนี้เพื่อออกแบบลักษณะโครงสร้างให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการนำไปใช้งานก่อน ซึ่งการศึกษาเชิงทฤษฎีคือการนำระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์ต่างๆ มาเป็นเครื่องมือในการศึกษา โดยระเบียบวิธีหนึ่งที่นิยมใช้และมีวิธีการที่ไม่ซับซ้อนรวมทั้งง่ายต่อการออกแบบ โปรแกรมคอมพิวเตอร์คือ ระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน (Transfer Matrix Method) [4 – 7] ซึ่งเป็นระเบียบวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการแพร่ผ่านตัวกลางแบบต่างๆ ของคลื่นแสง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก
- 1.2.2 เพื่อออกแบบและนำโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกไปประยุกต์ใช้งานในโครงสร้างเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาหลักการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอนและสร้างโปรแกรมคำนวณสำหรับโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในการศึกษาสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาเชิงทฤษฎีสำหรับโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกชนิดหนึ่งมิติ โดยระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ในการศึกษาคือ ระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอนซึ่งเป็นระเบียบวิธีที่ไม่ซับซ้อนและง่ายต่อการออกแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1.3.1 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสมบัติการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก เมื่อปัจจัยทางกายภาพที่เกี่ยวข้องได้แก่ ความหนาของชั้นไดอิเล็กทริกและชั้นโลหะ, มุมตกกระทบของแสง, จำนวนคาบของโครงสร้าง และชนิดวัสดุของฐานรองรับมีเงื่อนไขที่เปลี่ยนแปลงไป

1.3.2 ศึกษาแนวโน้มในการออกแบบสถานะบกพร่องของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นโครงสร้างเลเซอร์สารกึ่งตัวนำได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 ได้โปรแกรมคำนวณสมบัติการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่มีความถูกต้องในการคำนวณสูง

1.4.2 ได้ความรู้เกี่ยวกับหลักการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอนสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก

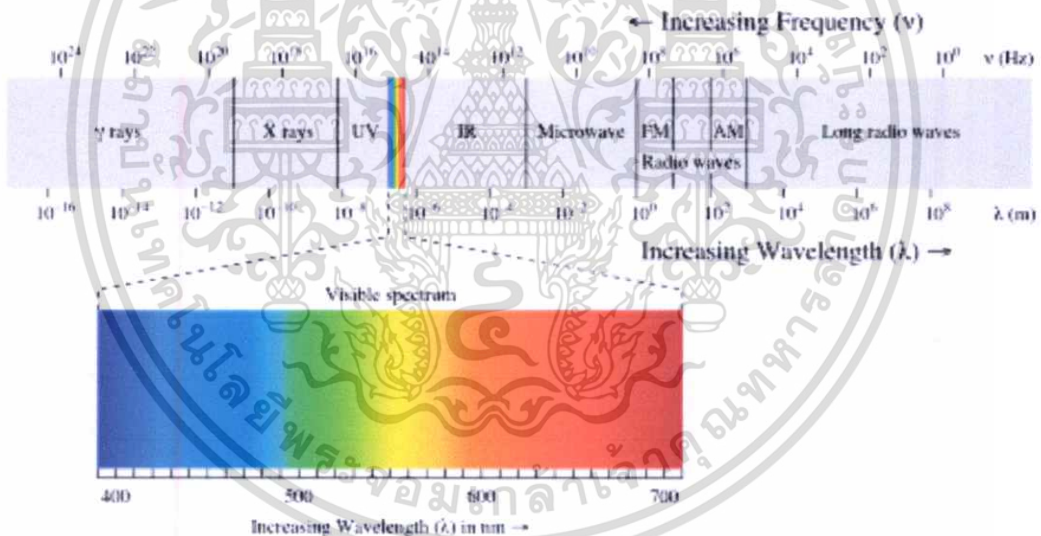
1.4.3 ได้โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่ถูกออกแบบสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานใน โครงสร้างเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แสง

แสง (Light) คือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400 – 700 นาโนเมตรดังแสดงให้เห็นในแถบสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปที่ 2.1 ซึ่งถือว่าเป็นช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าได้ ในขณะที่เดียวกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านที่ใกล้เคียงกันไม่ว่าจะเป็นรังสีอัลตราไวโอเล็ต (ความยาวคลื่นน้อยกว่า 400 นาโนเมตร) และรังสีอินฟราเรด (ความยาวคลื่นมากกว่า 700 นาโนเมตร) สามารถจัดเป็นคลื่นย่านแสงด้วยเช่นกันเมื่อไม่คำนึงถึงการมองเห็นด้วยตาของมนุษย์ และความเร็วของแสงนั้นมีค่าขึ้นอยู่กับตัวกลางที่แสงเดินทางผ่าน โดยความเร็วแสงในสุญญากาศมีค่าเท่ากับ 3×10^8 เมตร/วินาที



รูปที่ 2.1 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านต่างๆ [25]

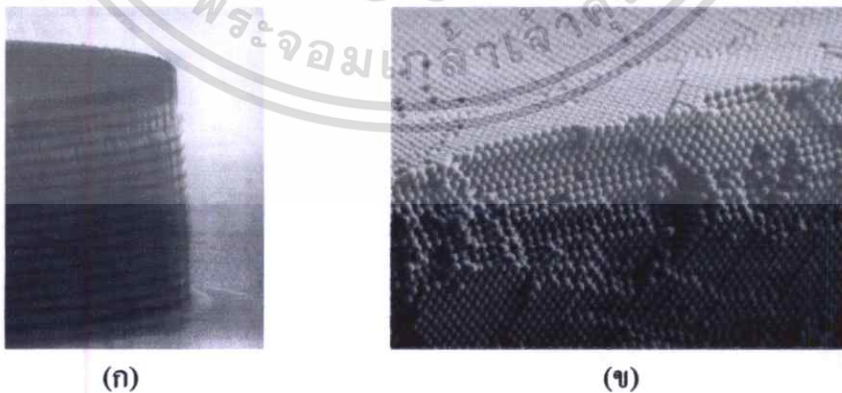
เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านนี้มีสมบัติทางฟิสิกส์ที่น่าสนใจหลากหลายไม่ว่าจะเป็น การสะท้อน, การหักเห, การเลี้ยวเบน, การแทรกสอด และการสะท้อนกลับหมดภายในตัวกลางต่างๆ ซึ่งสามารถนำคุณสมบัติเหล่านี้มาประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลายไม่ว่าจะเป็นด้านการแพทย์ ด้านอุตสาหกรรม และโดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านการสื่อสาร โดยสามารถใช้แสงเป็นตัวนำข้อมูลในการสื่อสารจากผู้ส่งไปยังผู้รับซึ่งในปัจจุบันการสื่อสารด้วยแสงกำลังเป็นที่นิยมเนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้มีขนาดเล็กและมีความรวดเร็วในการสื่อสารสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนวิชาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 นาโนโฟโตนิกส์

นาโนโฟโตนิกส์ คือสาขาย่อยสาขาหนึ่งของวิทยาการนาโนเทคโนโลยี โดยเป็นการศึกษาถึงอันตรกิริยาระหว่างแสงกับโครงสร้างที่มีขนาดเป็นลิบเท่าหรือร้อยเท่าของสเกลระดับนาโนเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นของแสงที่มาตกกระทบ การศึกษาเกี่ยวกับนาโนโฟโตนิกส์นี้อาจแบ่งการศึกษาเป็น 2 ส่วนได้แก่ การศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงใหม่ๆของโครงสร้างที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรและการออกแบบอุปกรณ์สำหรับประยุกต์ใช้งานต่างๆที่มีประสิทธิภาพสูงแต่มีขนาดเล็กและสิ้นเปลืองพลังงานต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุปกรณ์สำหรับระบบสื่อสารเชิงแสง (optical communications) เช่น ออปติคอลลสวิตช์, ท่อนำคลื่น, ออปติคอลลมัลติเพล็กซ์เซอร์และดีมัลติเพล็กซ์เซอร์, ออปติคอลลแอมพลิฟายเออร์, และระบบเลเซอร์สารกึ่งตัวนำซึ่งถือเป็นแหล่งกำเนิดแสงให้กับระบบสื่อสารนี้ เป็นต้น [1]

นอกจากการนำไปใช้ในระบบสื่อสารด้วยแสงแล้ว ยังมีอีกเป้าหมายหนึ่งของการพัฒนาวิจัยอุปกรณ์ทางด้านนาโนโฟโตนิกส์ คือการสร้างอุปกรณ์ในรูปแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แต่สามารถประมวลผลได้เร็วกว่าเพื่อในอนาคตจะได้ระบบคอมพิวเตอร์ที่มีอุปกรณ์ประมวลผลด้วยแสงเกิดขึ้นมา ซึ่งโครงสร้างที่ถูกออกแบบให้มีการทำงานเลียนแบบ โครงสร้างของผลึกสารกึ่งตัวนำได้แก่ ผลึกโฟโตนิก (Photonic crystals: PC) หรือ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง ซึ่งเป็นโครงสร้างที่สามารถควบคุมการแพร่ของแสงหรือการเคลื่อนที่ของโฟตอนภายในตัวกลางนี้ได้ เช่นเดียวกับกับกรณีที่อิเล็กตรอนถูกควบคุมการแพร่ภายใน โครงผลึกของสารกึ่งตัวนำ โดยโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง สามารถเกิดได้จากการจัดเรียงตัวอย่างเป็นคาบของชั้นฟิล์มบางหรือการจัดเรียงตัวเอง (Self assembly) ของอนุภาคคอลลอยด์ดังแสดงในรูปที่ 2.2



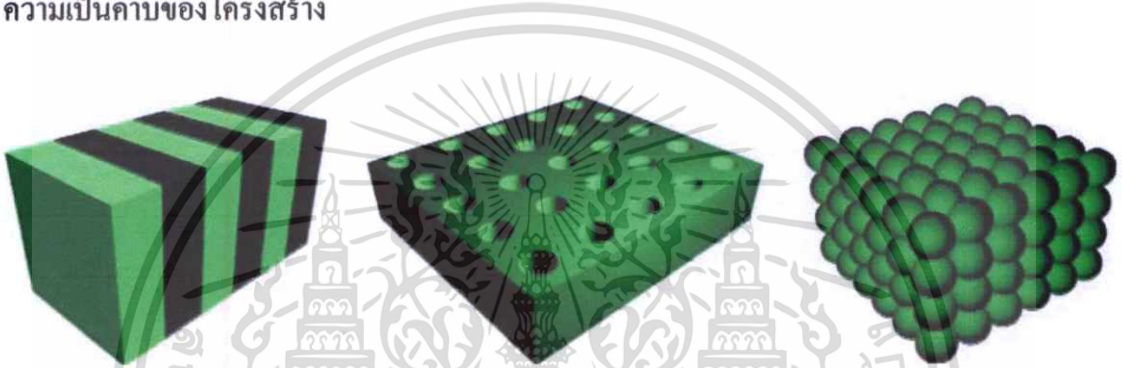
รูปที่ 2.2 (ก) โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงที่เกิดจากการจัดเรียงอย่างเป็นคาบของฟิล์มบาง [26]

(ข) โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงที่เกิดจากการจัดเรียงตัวเองของอนุภาคคอลลอยด์ [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง

โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง คือ โครงสร้างวัสดุที่สามารถควบคุมการแพร่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในโครงสร้างนี้ได้ ในลักษณะเดียวกับการควบคุมการแพร่ของอิเล็กตรอนภายในโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ โดยโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงถูกออกแบบให้มีการจัดเรียงของอนุภาคหรือโมเลกุลให้เกิดคุณสมบัติความเป็นคาบเนื่องจากความแตกต่างของดรรชนีหักเหของวัสดุที่เลือกใช้ โดยโครงสร้างชนิดนี้ถูกแบ่งออกเป็นสามประเภท ได้แก่ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบ 1 มิติ, แบบ 2 มิติ, และแบบ 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 [11] โดยแบ่งตามมิติความเป็นคาบของโครงสร้าง



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบ 1 มิติ, แบบ 2 มิติ, และแบบ 3 มิติ [6]

สำหรับในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงคุณสมบัติเชิงแสงของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบ 1 มิติซึ่งจัดว่าเป็นโครงสร้างที่มีความซับซ้อนน้อยที่สุดและง่ายต่อการศึกษาในเชิงทฤษฎี ดังนั้นในรายงานฉบับนี้หากกล่าวถึง โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงจึงหมายถึง โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบ 1 มิตินั่นเอง และพิจารณาว่าโครงสร้างนี้มีคุณสมบัติการดูดกลืนน้อยมากเมื่อมีแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาตกกระทบเทียบกับเส้นปกติ โดยการสะท้อนและหักเหบริเวณรอยต่อของตัวกลางแต่ละชั้น ส่งผลให้เกิดการแทรกสอดของแสงที่ส่งผ่านและสะท้อนโดยมีความยาวคลื่นของแสงบางช่วงที่เกิดการแทรกสอดแบบหักล้างหรือแสงความยาวคลื่นนี้ถูกสะท้อนออกมาหมด ความยาวคลื่นย่านนี้ถูกเรียกว่า “แถบช่องว่างทางแสง” ซึ่งคล้ายกับแถบช่องว่างพลังงานภายในโครงสร้างผลึกของแข็ง ส่วนความยาวคลื่นช่วงอื่นที่สามารถทะลุผ่านโครงสร้างนี้ไปได้ถูกเรียกว่า “โหมด” (modes) สำหรับขนาดของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงนั้นถูกออกแบบให้สอดคล้องกับขนาดของความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้งาน ดังนั้นสำหรับงานวิจัยนี้ศึกษาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านแสงที่ตามองเห็น ทำให้โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงนี้จึงถูกออกแบบให้มีขนาดในระดับนาโนเมตร

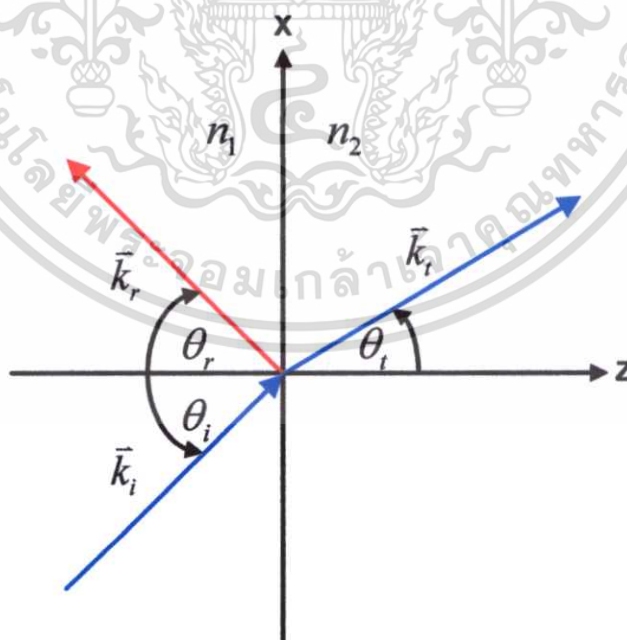
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การคำนวณที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง

ในหัวข้อนี้กล่าวถึงการคำนวณหาสมบัติการสะท้อนและการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง โดยเริ่มจากการพิจารณาการสะท้อนและการหักเหที่บริเวณรอยต่อของสารไดอิเล็กทริกสองชนิดซึ่งปรากฏการณ์นี้เป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการคำนวณหาสมบัติดังกล่าวของโครงสร้างชนิดนี้ เนื่องจากโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงเกิดจากรอยต่อตัวกลางไดอิเล็กทริกหลายๆรอยต่อ การสะท้อนและการหักเหจึงเกิดขึ้นหลายครั้งซึ่งเทคนิคการคำนวณที่นำมาประยุกต์ใช้กับการสะท้อนและการหักเหในรอยต่อตัวกลางหลายรอยต่อคือระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน [4 – 7] รายละเอียดทั้งหมดของการคำนวณถูกแสดงในหัวข้อต่างๆต่อไปนี้

2.4.1 การสะท้อนและหักเหของคลื่นระนาบบริเวณรอยต่อตัวกลางสองชนิด

จากความรู้พื้นฐานทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการตกกระทบของคลื่นแสงที่บริเวณรอยต่อตัวกลางไดอิเล็กทริกสองชนิดที่แตกต่างกัน [10] พบว่าคลื่นตกกระทบถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ คลื่นสะท้อนและคลื่นส่งผ่านหรือคลื่นที่เกิดการหักเหที่บริเวณรอยต่อตัวกลางดังแสดงในรูปที่ 2.4 จากการมีอยู่ของคลื่นทั้งสองชนิดทำให้จำเป็นต้องมีการนำเงื่อนไขขอบเขตที่บริเวณรอยต่อตัวกลางเข้ามาช่วยในการพิจารณาปัญหา



รูปที่ 2.4 แสดงคลื่นตกกระทบ, คลื่นสะท้อน และคลื่นส่งผ่านที่ระนาบตกกระทบใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ากำหนดให้ θ_i , θ_r และ θ_t คือมุมตกกระทบ, มุมสะท้อน, และมุมส่งผ่าน ของเวกเตอร์คลื่นซึ่งเทียบกับเส้นปกติของระนาบตกกระทบ ความสัมพันธ์ของครรรชนีหักเหในแต่ละตัวกลางรวมทั้งมุมทั้งสามชนิดมีค่าตามกฎของสเนลล์ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$n_1 \sin \theta_i = n_1 \sin \theta_r = n_2 \sin \theta_t \quad (2.1)$$

โดยที่เวกเตอร์คลื่น (Wave vector) ของคลื่นตกกระทบ, คลื่นสะท้อน, และคลื่นส่งผ่านมีค่าขึ้นกับครรรชนีหักเหของตัวกลางในบริเวณนั้นซึ่งขนาดของเวกเตอร์คลื่นเหล่านี้กำหนดได้จากสมการ

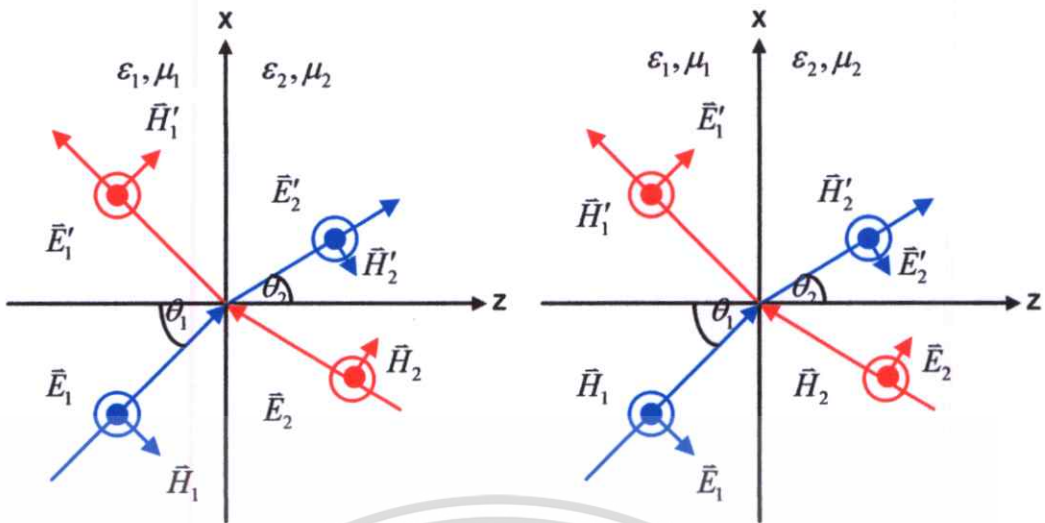
$$|\vec{k}_i| = |\vec{k}_r| = \frac{\omega}{c} n_1, \quad |\vec{k}_t| = \frac{\omega}{c} n_2 \quad (2.2)$$

และกำหนดเงื่อนไขขอบเขตบริเวณรอยต่อที่ $z = 0$ ทิศทางของเวกเตอร์คลื่นเหล่านี้มีค่าเท่ากันตามสมการ

$$(\vec{k}_i \cdot \hat{r})_{z=0} = (\vec{k}_r \cdot \hat{r})_{z=0} = (\vec{k}_t \cdot \hat{r})_{z=0} \quad (2.3)$$

ภายหลังจากพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตที่เกี่ยวข้องกับทิศทางการแพร่ของคลื่นแล้ว สิ่งที่จะต้องพิจารณาต่อมาก็คือความเข้มของคลื่นสะท้อนและคลื่นส่งผ่าน, การเปลี่ยนแปลงของเฟส, และสถานะการโพลาไรซ์ ซึ่งคุณสมบัติทั้งหมดขึ้นอยู่กับธรรมชาติของคลื่น ในแต่ละเงื่อนไขขอบเขตโดยแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนและคลื่นส่งผ่านสามารถถูกเขียนให้อยู่ในเทอมของคลื่นตกกระทบด้วยการใช้เงื่อนไขขอบเขตที่บริเวณ $z = 0$

ระบบพิกัดและสัญลักษณ์ที่ใช้แสดงการเกิดการสะท้อนและการส่งผ่านที่บริเวณรอยต่อตัวกลางสองชนิดที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกหรือค่าสภาพความยอมทางไฟฟ้า (Electric permittivity) และค่าสภาพความซึมซาบแม่เหล็ก (Magnetic permeability) เป็น ϵ_1 , μ_1 และ ϵ_2 , μ_2 ตามลำดับได้ถูกแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงการสะท้อนและการหักเหของคลื่นที่มีทิศทางโพลาไรซ์แบบ s (โหมด TE) และแบบ p (โหมด TM)

เมื่อคลื่นระนาบความถี่ ω และมีเวกเตอร์คลื่น \vec{k}_1 ตกกระทบบริเวณตัวกลางที่ 1 และเวกเตอร์คลื่นของคลื่นสะท้อนและคลื่นส่งผ่านคือ \vec{k}_1' และ \vec{k}_2 ตามลำดับ และกำหนดให้ระนาบตกกระทบอยู่ในระบบพิกัด xz เมื่อถือว่าตัวกลางที่พิจารณาเป็นตัวกลางที่มีความเป็นเนื้อเดียวหรือมีคุณสมบัติต่างๆที่ตลอดเนื้อสารแล้วสมการคลื่นระนาบที่แพร่ในตัวกลางชนิดนี้คือ

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad \text{และ} \quad \nabla^2 \vec{H} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0$$

โดยผลเฉลยทั่วไปของสมการคลื่นสำหรับสนามไฟฟ้าสามารถเขียนอยู่ในรูปผลรวมของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนของแต่ละตัวกลาง ได้แก่

$$\vec{E} = \begin{cases} (E_1 e^{-ik_1 \cdot \vec{r}} + E_1' e^{-ik_1' \cdot \vec{r}}) e^{i\omega t}, & z < 0 \\ (E_2 e^{-ik_2 \cdot \vec{r}} + E_2' e^{-ik_2' \cdot \vec{r}}) e^{i\omega t}, & z > 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

เมื่อ E_1 , E_1' , E_2 และ E_2' คือแอมพลิจูดสนามไฟฟ้าเชิงซ้อนสำหรับคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนในแต่ละตัวกลาง ในขณะที่ \vec{k}_1 คือเวกเตอร์คลื่นตกกระทบและ \vec{k}_2 คือเวกเตอร์คลื่นส่งผ่าน โดย \vec{k}_1' และ \vec{k}_2' คือภาพสะท้อนของเวกเตอร์คลื่น \vec{k}_1 และ \vec{k}_2 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาองค์ประกอบตามแกน z ของภาพสะท้อนเวกเตอร์คลื่นพบว่า $\vec{k}_{jz}' = -\vec{k}_{jz}$ เมื่อ $j=1, 2$ และสำหรับผลเฉลยทั่วไปของสมการคลื่นสำหรับสนามแม่เหล็กเราอาศัยความสัมพันธ์ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\vec{H} = \frac{i}{\omega\mu} \nabla \times \vec{E} \quad (2.5)$$

สำหรับกรณีที่มีคลื่นตกกระทบจากทางด้านซ้ายของตัวกลางแล้ว E_1 คือแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าตกกระทบ, E'_1 คือแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าสะท้อน, และ E_2 คือแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าส่งผ่าน โดยแอมพลิจูด E'_2 มีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากไม่มีคลื่นตกกระทบที่บริเวณ $z > 0$ แต่สำหรับโครงสร้างไดอิเล็กทริกหลายชั้นต้องนำ E'_2 มาพิจารณาเนื่องจากมีคลื่นตกกระทบที่เกิดจากคลื่นสะท้อนในชั้นไดอิเล็กทริกอื่นๆที่อยู่ติดกัน

เงื่อนไขขอบเขตสำหรับองค์ประกอบแทนเจนต์ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กซึ่งได้แก่ E_x , E_y , H_x และ H_y ต้องมีค่าต่อเนื่องที่บริเวณรอยต่อ $z=0$ โดยสามารถประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตนี้เพื่อหาองค์ประกอบของเวกเตอร์สนามที่ขนานและตั้งฉากกับระนาบตกกระทบ องค์ประกอบเวกเตอร์ของคลื่นทั้งสองชนิดนี้สามารถเขียนแยกออกจากกันได้สำหรับตัวกลางที่ 1 และที่ 2 และแสดงให้เห็นว่าตัวกลางทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติเป็นเอกพันธ์

2.4.1.1 การสะท้อนและส่งผ่านของคลื่นโพลาไรซ์แบบ s

คลื่นโพลาไรซ์แบบ s หรือคลื่นโหมด TE หมายถึงคลื่นที่มีเวกเตอร์สนามไฟฟ้า \vec{E} มีทิศทางตั้งฉากกับระนาบตกกระทบและเวกเตอร์สนามแม่เหล็กมีทิศทางเดียวกับเวกเตอร์คลื่นดังแสดงในรูปที่ 2.5 กำหนดให้ E_y และ H_x มีค่าต่อเนื่องที่ $z=0$ นำไปสู่ความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} E_{1s} + E'_{1s} &= E_{2s} + E'_{2s} \\ \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} (E_{1s} - E'_{1s}) \cos \theta_1 &= \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\mu_2}} (E_{2s} - E'_{2s}) \cos \theta_2 \end{aligned} \quad (2.6)$$

เมื่อ θ_1 และ θ_2 คือมุมของเวกเตอร์คลื่น \vec{k}_1 และ \vec{k}_2 ตามลำดับเมื่อเทียบกับเส้นปกติของระนาบตกกระทบ จากสมการเงื่อนไขด้านบนสามารถเขียนเป็นอยู่ในรูปเมทริกซ์ดังต่อไปนี้

$$D_{1s} \begin{bmatrix} E_{1s} \\ E'_{1s} \end{bmatrix} = D_{2s} \begin{bmatrix} E_{2s} \\ E'_{2s} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

เมื่อ

$$D_{js} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \sqrt{\frac{\epsilon_j}{\mu_j}} \cos \theta_j & -\sqrt{\frac{\epsilon_j}{\mu_j}} \cos \theta_j \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

โดยเมทริกซ์ D_{js} คือเมทริกซ์พลวัต (Dynamical matrix) ของคลื่นโพลาไรซ์แบบ s สำหรับตัวกลางที่ j ($j=1, 2$) ถ้าแสดงตกกระทบจากตัวกลางที่ 1 ดังนั้นสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสำหรับรอยต่อเดียวมีค่าเท่ากับ

$$r_s = \left(\frac{E'_{1s}}{E_{1s}} \right)_{E'_{2s}=0} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (2.9)$$

และ

$$t_s = \left(\frac{E_{2s}}{E_{1s}} \right)_{E'_{2s}=0} = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (2.10)$$

เมื่อ n_1 และ n_2 คือดัชนีหักเหของตัวกลางที่ 1 และ 2 โดยที่ค่าสภาพซึมซาบทางแม่เหล็กมีค่าคงที่ในทั้งสองตัวกลางหรือ $\mu_1 = \mu_2$ สำหรับความถี่ในย่านแสงที่ตามองเห็น

2.4.1.2 การสะท้อนและส่งผ่านของคลื่นโพลาไรซ์แบบ p

คลื่นโพลาไรซ์แบบ p หรือคลื่น โหมด TM หมายถึงคลื่นที่มีเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก \vec{H} มีทิศทางตั้งฉากกับระนาบตกกระทบ ส่วนเวกเตอร์สนามไฟฟ้าทั้งหมดขนานกับระนาบตกกระทบ และทิศทางของเวกเตอร์สนามแม่เหล็กมีทิศเดียวกับเวกเตอร์คลื่นดังแสดงในรูปที่ กำหนดให้ H_y และ E_x มีค่าต่อเนื่องที่ $z=0$ นำไปสู่

$$\begin{aligned} (E_{1p} + E'_{1p}) \cos \theta_1 &= (E_{2p} + E'_{2p}) \cos \theta_2 \\ \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} (E_{1p} - E'_{1p}) &= \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\mu_2}} (E_{2p} - E'_{2p}) \end{aligned} \quad (2.11)$$

จากสมการเงื่อนไขด้านบน สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์อีกครั้งดังนี้

$$D_{1p} \begin{bmatrix} E_{1p} \\ E'_{1p} \end{bmatrix} = D_{2p} \begin{bmatrix} E_{2p} \\ E'_{2p} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

เมื่อ

$$D_{jp} = \begin{bmatrix} \cos \theta_j & -\cos \theta_j \\ \sqrt{\frac{\epsilon_j}{\mu_j}} & \sqrt{\frac{\epsilon_j}{\mu_j}} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

โดยเมทริกซ์ D_{jp} คือเมทริกซ์พลวัตของคลื่นโพลาไรซ์แบบ p สำหรับตัวกลางที่ j ($j = 1, 2$) ถ้าแสดงตกกระทบจากตัวกลางที่ 1 ดังนั้นสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสำหรับรอยต่อเดียวมีค่าเท่ากับ

$$r_p = \left(\frac{E'_{1p}}{E_{1p}} \right)_{E'_{2p}=0} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (2.14)$$

และ

$$t_p = \left(\frac{E_{2p}}{E_{1p}} \right)_{E'_{2p}=0} = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (2.15)$$

โดยที่ค่าสภาพซึมซาบทางแม่เหล็กมีค่าคงที่ในทั้งสองตัวกลางหรือ $\mu_1 = \mu_2$ สำหรับความถี่ในย่านแสงที่ตามองเห็น ซึ่งสมการเหล่านี้เรียกว่า “สมการเฟรชเนล” เมื่อ r_s และ r_p คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนของเฟรชเนล (Fresnel reflection coefficient) และ t_s และ t_p คือสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของเฟรชเนล (Fresnel transmission coefficient) ซึ่งสมการเหล่านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโครงสร้างไดอิเล็กตริกหลายชั้นได้

2.4.1.3 ค่าการสะท้อนและส่งผ่าน

จากหัวข้อที่ผ่านมาเราสามารถคำนวณหาค่าการสะท้อน (Reflectance) และค่าการส่งผ่าน (Transmittance) สำหรับรอยต่อเดียวได้ด้วยการใช้สัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของเฟรชเนล เพื่อนำมาคำนวณหาค่าการสะท้อนและค่าการส่งผ่านสำหรับคลื่นโพลาไรซ์แบบ s และแบบ p ได้ดังนี้

$$R_s = |r_s|^2 \quad (2.16)$$

$$R_p = |r_p|^2 \quad (2.17)$$

และ

$$T_s = \frac{n_2 \cos \theta_2 |t_s|^2}{n_1 \cos \theta_1} \quad (2.18)$$

$$T_p = \frac{n_2 \cos \theta_2 |t_p|^2}{n_1 \cos \theta_1} \quad (2.19)$$

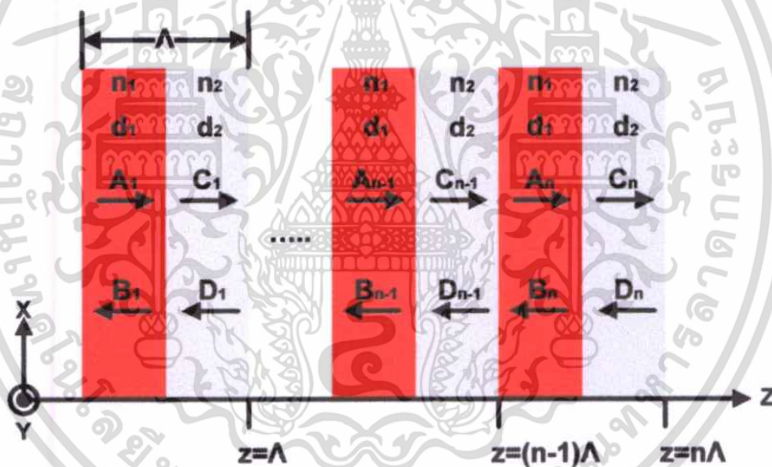
ซึ่งสำหรับตัวกลางที่เป็นสารไดอิเล็กตริกบริสุทธิ์ (ไม่มีคุณสมบัติดูดกลืน) ที่มีครรชนหักเหเป็น

จำนวนจริงแล้วสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านและค่าการสะท้อนได้เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนวิชาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$R+T=1$ หรือเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน แต่สำหรับตัวกลางที่มีคุณสมบัติการดูดกลืนหรือมีครรชนีหักเหเป็นจำนวนเชิงซ้อนแล้วความสัมพันธ์ของค่าการสะท้อน, ค่าการส่งผ่านและค่าการดูดกลืนจะเปลี่ยนเป็น $R+T+A=1$ เมื่อ A คือค่าการดูดกลืนของตัวกลาง

2.4.2 ระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอนสำหรับโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง

จากหัวข้อที่ผ่านมาได้อธิบายถึงการสะท้อนและหักเหบริเวณรอยต่อเดี่ยวซึ่งเกิดจากตัวกลางไดอิเล็กทริกสองชนิดที่แตกต่างกันรวมทั้งการหาค่าการสะท้อนและการส่งผ่านของตัวกลางดังกล่าว สำหรับในหัวข้อนี้กล่าวถึงการสะท้อนและหักเหของตัวกลางชั้นสารไดอิเล็กทริกสองชนิดที่มีการจัดเรียงตัวแบบเป็นคาบตามแนวแกน z หรือโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง [10, 12] โดยโครงสร้างชนิดนี้มีคุณสมบัติพิเศษที่แตกต่างจากตัวกลางแสงชนิดอื่นๆ คือสามารถสะท้อนแสงบางช่วงความยาวคลื่นออกไปได้ทั้งหมด ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่เลือกใช้และความหนาของชั้นไดอิเล็กทริก



รูปที่ 2.6 โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงที่เกิดจากชั้นสารไดอิเล็กทริกที่มีครรชนีหักเหเท่ากับ n_1 และ n_2 โดยถูกจัดวางตามแนวแกน z

ลักษณะของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงที่เกิดจากวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีครรชนีหักเหเป็น n_1 และ n_2 มีความหนาของแต่ละชั้นเท่ากับ d_1 และ d_2 และมีความยาวคาบเท่ากับ Λ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 พบว่าเมื่อมีคลื่นแสงตกกระทบบที่บริเวณผิวหน้าของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง ทำให้เกิดการสะท้อนและส่งผ่านแบบเฟรชเนลซึ่งจะเกิดปรากฏการณ์เหล่านี้ไปในทุกชั้นไดอิเล็กทริก ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาการสะท้อนและหักเหได้เช่นเดียวกันกับการสะท้อนและหักเหในสารไดอิเล็กทริกชั้นเดียว เพื่อลดความซับซ้อนในการอธิบายจึงกำหนดให้สิ่งแวดล้อมที่อยู่รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างในรูปที่ 2.6 ทั้งหมดคืออากาศเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบเนื่องจากครรชนีหักเหของบริเวณคกกระทบและครรชนีหักเหของฐานรองโครงสร้าง เมื่อพิจารณาโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงดังรูปที่ 2.6 พบว่าการเปลี่ยนแปลงครรชนีหักเหตามแนวแกน z ของโครงสร้างสามารถเขียนในรูปแบบฟังก์ชันคาบได้เป็น

$$n(z) = \begin{cases} n_1, & 0 < z < d_1 \\ n_2, & d_1 < z < \Lambda \end{cases} \quad (2.20)$$

และ

$$n(z) = n(z + \Lambda) \quad (2.21)$$

ซึ่งพบว่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของคลื่นแสงตามแนวแกน z ภายในโครงสร้างชนิดนี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของผลรวมของสนามไฟฟ้าที่มีการแพร่ในทิสฟอร์เวิร์ดและแบคเวิร์ดภายในชั้นไดอิเล็กทริกแต่ละชั้นได้เป็น

$$\vec{E}(z) = \begin{cases} A_n e^{-ik_{1z}d_1} + B_n e^{ik_{1z}d_1}, & (n-1)\Lambda < z < n\Lambda - d_2 \\ C_n e^{-ik_{2z}d_2} + D_n e^{ik_{2z}d_2}, & n\Lambda - d_2 < z < n\Lambda \end{cases} \quad (2.22)$$

โดยองค์ประกอบเวกเตอร์คลื่นตามแนวแกน z ภายในตัวกลางแต่ละชนิดมีค่าเท่ากับ

$$k_{1z} = \left[\left(\frac{\omega}{c} n_1 \right)^2 - k_{1x}^2 \right]^{1/2} = \frac{\omega}{c} n_1 \cos \theta_1$$

$$k_{2z} = \left[\left(\frac{\omega}{c} n_2 \right)^2 - k_{2x}^2 \right]^{1/2} = \frac{\omega}{c} n_2 \cos \theta_2 \quad (2.23)$$

เมื่อ θ_1 และ θ_2 คือมุมของรังสีแสงภายในตัวกลางแต่ละชนิด ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าภายในตัวกลางแต่ละชั้นได้ในรูปแบบเมทริกซ์ดังแสดงในหัวข้อการสะท้อนและการส่งผ่านของแสงบริเวณรอยต่อสารไดอิเล็กทริก เริ่มจากความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดสนามไฟฟ้า A_n, B_n, C_n และ D_n ซึ่งถูกแสดงความสัมพันธ์ในรูปเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} A_{n-1} \\ B_{n-1} \end{bmatrix} = D_1^{-1} D_2 P_2 \begin{bmatrix} C_{n-1} \\ D_{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะวิธีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} C_{n-1} \\ D_{n-1} \end{bmatrix} = D_2^{-1} D_1 P_1 \begin{bmatrix} A_n \\ B_n \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

เมื่อเมทริกซ์ D_1 และ D_2 คือเมทริกซ์พลวัต ซึ่งมีค่าตามสมการ (2.8) ในขณะที่เมทริกซ์ P_j คือเมทริกซ์การแพร่ (Propagation matrix) สำหรับตัวกลางแต่ละชนิดซึ่งเป็นเมทริกซ์ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงเฟสของคลื่นแสงในตัวกลางนั้น เมื่อ $j=1,2$ โดยมีค่าเท่ากับ

$$P_j = \begin{bmatrix} e^{ik_{\mu}d_j} & 0 \\ 0 & e^{-ik_{\mu}d_j} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

แทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆลงในเมทริกซ์ D_1 , D_2 , P_1 และ P_2 ดังนั้นสมการ (2.24) และสมการ (2.25) จึงมีค่าเปลี่ยนเป็น

$$\begin{bmatrix} A_{n-1} \\ B_{n-1} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} e^{ik_{2z}d_2} \left(1 + \frac{k_{2z}}{k_{1z}}\right) & e^{-ik_{2z}d_2} \left(1 - \frac{k_{2z}}{k_{1z}}\right) \\ e^{ik_{2z}d_2} \left(1 - \frac{k_{2z}}{k_{1z}}\right) & e^{-ik_{2z}d_2} \left(1 + \frac{k_{2z}}{k_{1z}}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{n-1} \\ D_{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

และ

$$\begin{bmatrix} C_{n-1} \\ D_{n-1} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} e^{ik_{1z}d_1} \left(1 + \frac{k_{1z}}{k_{2z}}\right) & e^{-ik_{1z}d_1} \left(1 - \frac{k_{1z}}{k_{2z}}\right) \\ e^{ik_{1z}d_1} \left(1 - \frac{k_{1z}}{k_{2z}}\right) & e^{-ik_{1z}d_1} \left(1 + \frac{k_{1z}}{k_{2z}}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_n \\ B_n \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

แทนค่าเมทริกซ์ $\begin{bmatrix} C_{n-1} \\ D_{n-1} \end{bmatrix}$ ลงในสมการ (2.27) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างเมทริกซ์ $\begin{bmatrix} A_{n-1} \\ B_{n-1} \end{bmatrix}$ กับเมทริกซ์ $\begin{bmatrix} A_n \\ B_n \end{bmatrix}$ ซึ่งเป็นแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าในชั้นตัวกลางที่มีดรรชนีหักเหสูงชั้นที่ $n-1$ และชั้นที่ n ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} A_{n-1} \\ B_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_n \\ B_n \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

ซึ่งเมทริกซ์ $\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}$ ถูกเรียกว่า “เมทริกซ์ถ่ายโอน” (Transfer matrix) สำหรับคู่ชั้นไดอิเล็กทริก 1

เลือกทริก 1 คาบซึ่งสมาชิกของเมทริกซ์ถ่ายโอนแต่ละตัวมีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
m_{11} &= e^{ik_{1z}d_1} \left[\cos k_{2z}d_2 + \frac{1}{2}i \left(\frac{k_{2z}}{k_{1z}} + \frac{k_{1z}}{k_{2z}} \right) \sin k_{2z}d_2 \right] \\
m_{12} &= e^{-ik_{1z}d_1} \left[\frac{1}{2}i \left(\frac{k_{2z}}{k_{1z}} - \frac{k_{1z}}{k_{2z}} \right) \sin k_{2z}d_2 \right] \\
m_{21} &= e^{ik_{1z}d_1} \left[-\frac{1}{2}i \left(\frac{k_{2z}}{k_{1z}} - \frac{k_{1z}}{k_{2z}} \right) \sin k_{2z}d_2 \right] \\
m_{22} &= e^{-ik_{1z}d_1} \left[\cos k_{2z}d_2 - \frac{1}{2}i \left(\frac{k_{2z}}{k_{1z}} + \frac{k_{1z}}{k_{2z}} \right) \sin k_{2z}d_2 \right]
\end{aligned} \tag{2.30}$$

สำหรับกรณีที่คลื่นตกกระทบเป็นคลื่นโพลาไรซ์แบบ s และสำหรับกรณีคลื่นโพลาไรซ์แบบ p สมาชิกของเมทริกซ์ถ่ายโอนมีค่าเป็น

$$\begin{aligned}
m_{11} &= e^{ik_{1z}d_1} \left[\cos k_{2z}d_2 + \frac{1}{2}i \left(\frac{n_2^2 k_{1z}}{n_1^2 k_{2z}} + \frac{n_1^2 k_{2z}}{n_2^2 k_{1z}} \right) \sin k_{2z}d_2 \right] \\
m_{12} &= e^{-ik_{1z}d_1} \left[\frac{1}{2}i \left(\frac{n_2^2 k_{1z}}{n_1^2 k_{2z}} - \frac{n_1^2 k_{2z}}{n_2^2 k_{1z}} \right) \sin k_{2z}d_2 \right] \\
m_{21} &= e^{ik_{1z}d_1} \left[-\frac{1}{2}i \left(\frac{n_2^2 k_{1z}}{n_1^2 k_{2z}} - \frac{n_1^2 k_{2z}}{n_2^2 k_{1z}} \right) \sin k_{2z}d_2 \right] \\
m_{22} &= e^{-ik_{1z}d_1} \left[\cos k_{2z}d_2 - \frac{1}{2}i \left(\frac{n_2^2 k_{1z}}{n_1^2 k_{2z}} + \frac{n_1^2 k_{2z}}{n_2^2 k_{1z}} \right) \sin k_{2z}d_2 \right]
\end{aligned} \tag{2.31}$$

แต่เมื่อโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงมีจำนวนคาบของคู่ชั้นไดอิเล็กตริกเท่ากับ n แล้วสมการแสดงความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดสนามไฟฟ้าภายในชั้นที่ $n-1$ กับชั้นที่ n จึงมีค่าเปลี่ยนเป็น

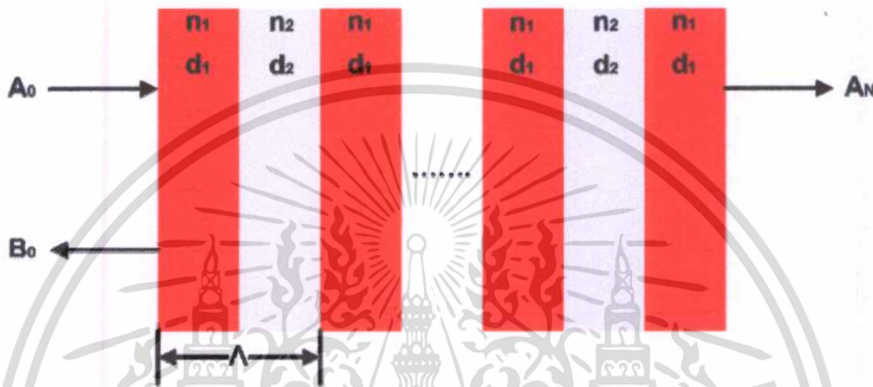
$$\begin{bmatrix} A_{n-1} \\ B_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}^n \begin{bmatrix} A_n \\ B_n \end{bmatrix} \tag{2.32}$$

หมายเหตุ: การสร้างสมการเมทริกซ์ถ่ายโอนซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดสนามไฟฟ้าในตัวกลางที่มีดรรชนีหักเหสูงชั้นที่ $n-1$ กับตัวกลางชั้นที่ n ดังแสดงในสมการ นอกจากนี้ยังสามารถสร้างสมการเมทริกซ์ถ่ายโอนแสดงความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดสนามไฟฟ้าในตัวกลางที่มีดรรชนีหักเหต่ำชั้นที่ $n-1$ และชั้นที่ n ได้ด้วยวิธีการที่คล้ายคลึงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 ค่าการสะท้อนและส่งผ่านสำหรับโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง

การสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวแบบเป็นคาบซึ่งการเลี้ยวเบนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายใน โครงสร้างนี้คล้ายคลึงกับการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ผ่าน โครงผลึกของแข็งที่มีคุณสมบัติความเป็นคาบเช่นกัน ในกรณีนี้พิจารณา โครงสร้างแบบเป็นคาบที่มีจำนวนคาบเท่ากับ N คาบที่ถูกล้อมรอบด้วยชั้นตัวกลางไดอิเล็กทริกที่มีดรรชนีหักเหเท่ากับ n_1 มีลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างแบบเป็นคาบที่ถูกออกแบบให้มีคุณสมบัติเป็นกระจกสะท้อนแบบแบรค

เมื่อกำหนดให้แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าตกกระทบและแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าสะท้อนคือ A_0 และ B_0 โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกส่งผ่านจากโครงสร้างนี้ไปมีแอมพลิจูดสนามไฟฟ้าเป็น A_N และไม่มีสนามไฟฟ้าตกกระทบจากทางด้านขวาของโครงสร้างหรือ $B_N = 0$ สัมประสิทธิ์การสะท้อนของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงมีค่าเท่ากับ

$$r = \left(\frac{B_0}{A_0} \right)_{B_N=0} \tag{2.33}$$

และสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจึงสามารถถูกเขียนอยู่ในรูปอัตราส่วนของสนามไฟฟ้าที่ส่งผ่านออกมาจากสารไดอิเล็กทริกชั้นสุดท้ายกับสนามไฟฟ้าตกกระทบมีค่าเท่ากับ

$$t = \left(\frac{A_N}{A_0} \right)_{B_N=0} \tag{2.34}$$

จากสมการเมทริกซ์ถ่ายโอนดั่งสมการ (2.32) ซึ่งสำหรับโครงสร้างแบบเป็นคาบในรูปที่ 2.7 สมการเมทริกซ์แสดงความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดสนามไฟฟ้าตกกระทบและแอมพลิจูดสนามไฟฟ้าส่งผ่านได้มีค่าเป็น

$$\begin{bmatrix} A_0 \\ B_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}^N \begin{bmatrix} A_N \\ B_N \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

เมื่อกำลังที่ N ของเมทริกซ์ถ่ายโอนในสมการ (2.35) มีค่าเท่ากับ

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}^N = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

ดังนั้นสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection coefficient) ของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงที่มีจำนวนคาบเป็น N คาบที่ถูกแสดงดั่งสมการ (2.33) เมื่อแทนค่า $B_N = 0$ จึงมีค่าเป็น

$$r = \frac{M_{21}}{M_{11}} \quad (2.36)$$

สำหรับค่าการสะท้อน (Reflectance) ของโครงสร้างชนิดนี้สามารถหาได้จากการยกกำลังสองค่าสัมบูรณ์ของสัมประสิทธิ์การสะท้อนในสมการ (2.36) มีค่าเป็น

$$R = |r|^2 = \left| \frac{M_{21}}{M_{11}} \right|^2 \quad (2.37)$$

สำหรับสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission coefficient) ของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงที่มีจำนวนคาบเท่ากับ N คาบที่ถูกแสดงดั่งสมการ (2.33) เมื่อแทนค่า $B_N = 0$ จึงมีค่าเป็น

$$t = \frac{1}{M_{11}} \quad (2.38)$$

สำหรับค่าการส่งผ่าน (Transmittance) ของโครงสร้างชนิดนี้สามารถหาได้จากการยกกำลังสองค่าสัมบูรณ์ของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในสมการ (2.38) มีค่าเป็น

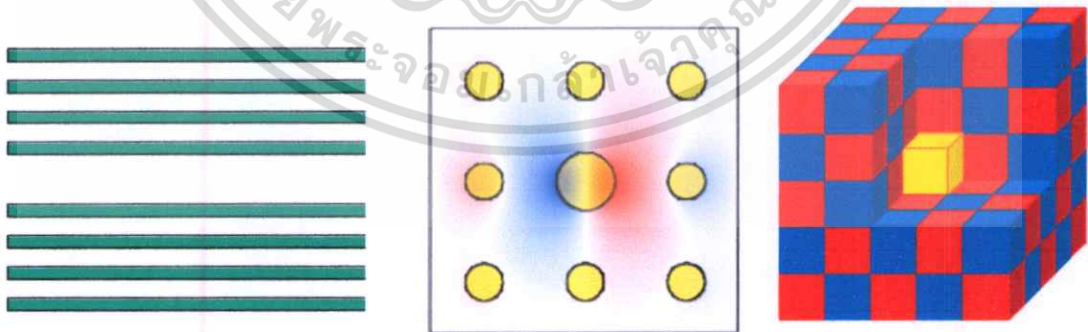
$$T = |t|^2 = \left| \frac{1}{M_{11}} \right|^2 \quad (2.39)$$

ในกรณีที่สิ่งแวดล้อมที่อยู่รอบโครงสร้างแถบช่องว่างไม่เป็นอากาศทั้งหมด โดยพิจารณาให้บริเวณที่คลื่นแสงตกกระทบด้วยมุม θ_0 มีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ n_0 และฐานรองของโครงสร้างมีดัชนีหักเหเท่ากับ n_s แล้วค่าการส่งผ่านในสมการ (2.39) จึงเปลี่ยนเป็น

$$T = \frac{n_s \cos \theta_s}{n_0 \cos \theta_0} \left| \frac{1}{M_{11}} \right|^2 \quad (2.40)$$

2.5 สถานะบกพร่องของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง

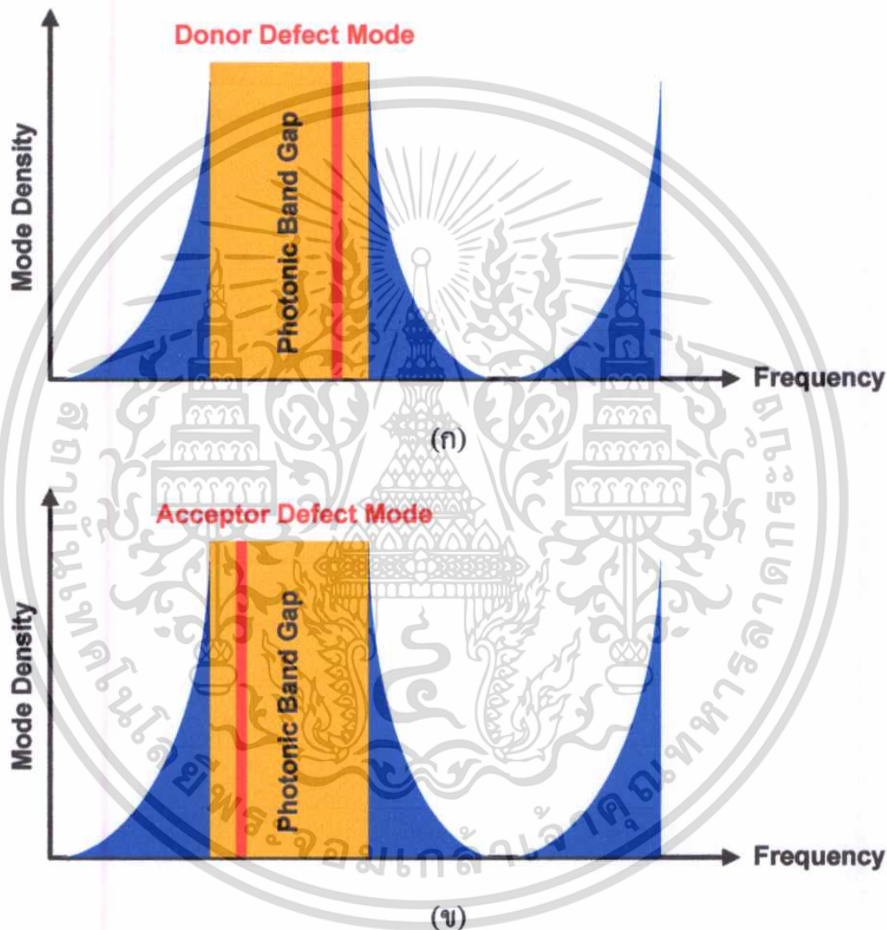
สำหรับผลึกโฟโตนิกหรือโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงซึ่งเป็นโครงสร้างซึ่งเกิดจากการจัดเรียงอย่างเป็นคาบของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกใน 1 มิติ, 2 มิติ, และ 3 มิติ เมื่อมีคลื่นแสงตกกระทบที่โครงสร้างเหล่านี้ทำให้เกิดการส่งผ่านสำหรับคลื่นแสงบางความยาวคลื่นและมีความยาวคลื่นที่ถูกสะท้อนออกไปหรือที่เรียกว่า “แถบช่องว่างทางแสง” ต่อมาเมื่อโครงสร้างแบบเป็นคาบทั้งสามแบบถูกเติมข้อบกพร่องให้กับโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.8 และเรียกโครงสร้างที่มีข้อบกพร่องว่า “สถานะบกพร่องของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง” (Defect state of Photonic Band Gap structure) โดยข้อบกพร่องที่ถูกเพิ่มเข้ามาในโครงสร้างจะทำหน้าที่เป็นโพรงกักทอนซึ่งคลื่นแสงที่มีความถี่ตรงกับความถี่กักทอนของโพรงจะถูกจำกัดอยู่ภายในข้อบกพร่อง [2, 12]



รูปที่ 2.8 ลักษณะของข้อบกพร่องภายในโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงชนิด 1 มิติ, 2 มิติ และ 3 มิติ [28]

การเติมข้อบกพร่องให้กับโครงสร้างแบบเป็นคาบนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการเจือสารหรือโดปสารให้กับโครงผลึกสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic Semiconductor) โดยการเติมข้อบกพร่องที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่าไดอิเล็กทริกสูงกว่าส่งผลให้โครงสร้างใหม่ที่เกิดขึ้นเทียบได้กับอะตอมผู้ให้ (Donor atoms) ของสารกึ่งตัวนำ คือทำให้เกิดความหนาแน่นของโหมดความถี่สูงภายในแถบช่องว่างดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) แต่เมื่อข้อบกพร่องของโครงสร้างเกิดจากนำชั้น ไดอิเล็กทริกออกไปเกิดเป็นข้อบกพร่องที่มีค่าไดอิเล็กทริกต่ำกว่าหรือเพิ่มขึ้น ไดอิเล็กทริกที่มีค่าไดอิเล็กทริกต่ำกว่าลงไปส่งผลให้โครงสร้างใหม่ที่เกิดขึ้นเทียบได้กับอะตอมผู้รับ (Acceptor atoms) ของสารกึ่งตัวนำคือทำให้เกิดความหนาแน่นของโหมดความถี่ต่ำภายในแถบช่องว่างดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ข)



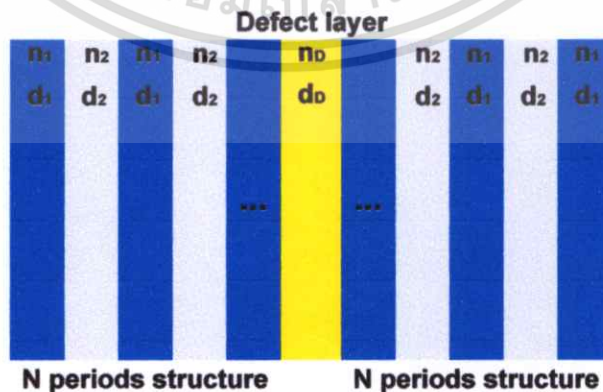
รูปที่ 2.9 (ก) ความหนาแน่นของโหมดความถี่สูงภายในแถบช่องว่างทางแสงซึ่งเกิดจากการเพิ่มข้อบกพร่องที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูงกว่าในโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง [2]
(ข) ความหนาแน่นของโหมดความถี่ต่ำภายในแถบช่องว่างทางแสงซึ่งเกิดจากการเพิ่มข้อบกพร่องที่มีค่าไดอิเล็กทริกต่ำกว่าในโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง [2]

โหมดของคลื่นแสงที่เกิดขึ้นภายในแถบช่องว่างทางแสงถูกเรียกว่า “โหมดข้อบกพร่อง” (Defect mode) ซึ่งโหมดชนิดนี้เกิดขึ้นจากคลื่นนิ่ง (Standing wave) หรือโหมดที่เกิดการก้ำกอน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายในข้อบกพร่องของโครงสร้างซึ่งประพุดิตัวเป็น โพรงำทอน (Resonant cavity) โดยคลื่นนิ่งนี้เกิดจากโหมดคลื่นแสงที่ถูกสะท้อนไปมาภายในโพรงำทอนที่มีความหนา d_D มีเฟสตรงกันส่งผลให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมกลายเป็นคลื่นนิ่งหรือโหมดข้อบกพร่องภายในแถบช่องว่างทางแสง และเรียกปรากฏการณ์ที่ทำให้เกิดโหมดข้อบกพร่องว่า “Photon localization” ต่อมาเมื่อขนาดของข้อบกพร่องหรือครรชนีหักเหของข้อบกพร่องเปลี่ยนแปลงไปโหมดที่ทำให้เกิดคลื่นนิ่งภายในข้อบกพร่องต้องมีความยาวคลื่นหรือความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้น โหมดข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจึงมีตำแหน่งที่เลื่อนไปเมื่อกับตำแหน่งเดิม โดยเมื่อค่าครรชนีหักเหของข้อบกพร่องเพิ่มขึ้นหรือขนาดของข้อบกพร่องลดลงโหมดที่มีความยาวคลื่นสั้นหรือความถี่สูงจะเกิดการกำทอนได้เป็น โหมดข้อบกพร่องที่อยู่ในย่านความถี่สูง ในทางตรงกันข้ามเมื่อค่าครรชนีหักเหของข้อบกพร่องลดลงหรือขนาดของข้อบกพร่องเพิ่มขึ้น โหมดที่มีความยาวคลื่นยาวหรือความถี่ต่ำจะเกิดการกำทอนได้เป็น โหมดข้อบกพร่องที่อยู่ในย่านความถี่ต่ำ

2.5.1 สถานะบกพร่องของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบ 1 มิติ

สำหรับงานวิจัยนี้ให้ความสนใจศึกษาโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงที่ใช้เป็นโครงสร้างแบบ 1 มิติซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวของชั้นไดอิเล็กทริกที่มีค่าไดอิเล็กทริกหรือครรชนีหักเหแตกต่างกัน โดยข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบ 1 มิติมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.10 ซึ่งข้อบกพร่องนี้อาจเกิดจากการแทนที่ชั้น ไดอิเล็กทริกที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูงกว่าหรือต่ำกว่าชั้น ไดอิเล็กทริกอื่นของโครงสร้างแบบเป็นคาบ นอกจากนี้ยังสามารถมองสถานะบกพร่องของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบ 1 มิติเกิดจากการที่ชั้น ไดอิเล็กทริกซึ่งเป็นข้อบกพร่องถูกประกบด้วยโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงที่มีจำนวนคาบเท่ากับ N ทั้งทางด้านซ้ายและขวา



รูปที่ 2.10 สถานะบกพร่องของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบ 1 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.10 โครงสร้างแบบเป็นคาบทางด้านซ้ายและขวาเป็นปัจจัยในการกำหนดว่า โหมดความถี่ใดจะเกิดการกำทอนภายในข้อบกพร่อง โดยโหมดที่ทำให้โครงสร้างแบบเป็นคาบ หรืออาจพิจารณาเป็นกระจกสะท้อนแบบเบรค (Bragg reflector) มีค่าการสะท้อนสูงสุดจะเกิดการกำทอนภายในข้อบกพร่องหรือโพรงกำทอนและเกิดขึ้นเป็นโหมดข้อบกพร่องภายในแถบช่องว่างทางแสง

2.5.2 ระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอนของโครงสร้างที่มีการเติมชั้นข้อบกพร่อง

ในการออกแบบโครงสร้างที่มีการเติมชั้นข้อบกพร่องนั้น สิ่งสำคัญคือชั้นข้อบกพร่องที่เติมลงในโครงสร้างแบบเป็นคาบนั้นต้องมีค่าดัชนีหักเหที่แตกต่างจากชั้น ไดอิเล็กทริกชั้นใดชั้นหนึ่ง ซึ่งประกอบขึ้นเป็น โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง เมื่อกำหนดให้ชั้นข้อบกพร่องมีดัชนีหักเหเป็น n_D และมีความหนาเท่ากับ d_D เพื่อทำการหาความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าตกกระทบและส่งผ่าน โครงสร้างชนิดนี้ จึงยังคงใช้เทคนิคการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน เช่นเดียวกับ โครงสร้างแบบเป็นคาบ [12] โดยสมการแสดงความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าตกกระทบและส่งผ่านถูกแสดงดังสมการ

$$\begin{bmatrix} A_i \\ B_i \end{bmatrix} = M_L^N M_D M_R^N \begin{bmatrix} A_t \\ B_t \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

เมื่อ M_L คือเมทริกซ์ถ่ายโอนของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงด้านซ้ายของชั้นข้อบกพร่อง
 M_R คือเมทริกซ์ถ่ายโอนของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงด้านขวาของชั้นข้อบกพร่อง
 M_D คือเมทริกซ์ถ่ายโอนของชั้นข้อบกพร่อง

โดยสมาชิกของเมทริกซ์ M_L และ M_R ซึ่งเป็นเมทริกซ์ถ่ายโอนของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงที่ยังคงมีคุณสมบัติความเป็นคาบอยู่และมีจำนวนคาบของ โครงสร้างเท่ากับ N ดังนั้นสมาชิกของเมทริกซ์ถ่ายโอนเหล่านี้จึงมีค่าสอดคล้องกับสมการ (2.30) เนื่องจากพิจารณาว่าคลื่นแสงตกกระทบมีการโพลาไรซ์แบบ s แต่สำหรับเมทริกซ์ถ่ายโอนของชั้นข้อบกพร่องมีค่าเท่ากับ

$$M_D = \frac{1}{2} i \begin{bmatrix} \left(\frac{k_{1z}^2 + k_{Dz}^2}{k_{1z} k_{Dz}} \right) e^{ik_{Dz} d_D} & \left(\frac{k_{1z}^2 - k_{Dz}^2}{k_{1z} k_{Dz}} \right) e^{-ik_{Dz} d_D} \\ - \left(\frac{k_{1z}^2 - k_{Dz}^2}{k_{1z} k_{Dz}} \right) e^{ik_{Dz} d_D} & - \left(\frac{k_{1z}^2 + k_{Dz}^2}{k_{1z} k_{Dz}} \right) e^{-ik_{Dz} d_D} \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

เมื่อแทนค่าสมาชิกของเมทริกซ์ M_L , M_R และ M_D แล้วกำหนดให้ผลคูณของเมทริกซ์ทั้งสาม เมทริกซ์เป็นเมทริกซ์ถ่ายโอนของโครงสร้างที่มีการเติมชั้นข้อบกพร่องหรือ D เมื่อ

$$D = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

ในที่นี้ไม่ได้แสดงค่าของสมาชิกของเมทริกซ์ D เนื่องจากการแสดงสมาชิกของเมทริกซ์ D นั้นมีวิธีการที่ค่อนข้างซับซ้อนจากการคูณเมทริกซ์ถึงสามเมทริกซ์ ซึ่งในการศึกษานี้ได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการช่วยหาค่าออกมา และความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าตกกระทบและสนามไฟฟ้าส่งผ่านจึงเขียนได้เป็น

$$\begin{bmatrix} A_t \\ B_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_i \\ B_i \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

หมายเหตุ A_i, B_i คือแอมพลิจูดสนามไฟฟ้าตกกระทบที่มีการแพร่ในทิสฟอว์เวิร์ดและแบคเวิร์ดและ A_t, B_t คือแอมพลิจูดสนามไฟฟ้าส่งผ่านที่มีการแพร่ในทิสฟอว์เวิร์ดและแบคเวิร์ด

2.5.3 ค่าการสะท้อนและค่าการส่งผ่านสำหรับโครงสร้างที่มีการเติมชั้นข้อบกพร่อง

ค่าการสะท้อนและการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงที่มีการเติมชั้นข้อบกพร่องดังแสดงในรูปที่ 2.8 เมื่อสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบจากทางด้านขวามีค่าเป็นศูนย์หรือ $B_i = 0$ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนซึ่งสามารถกำหนดได้จากสมาชิกเมทริกซ์ถ่ายโอนได้เช่นเดียวกันกับในหัวข้อที่ 2.4.3 ดังนั้นสัมประสิทธิ์การสะท้อนของโครงสร้างชนิดนี้จึงมีค่าเป็น

$$r_D = \frac{D_{21}}{D_{11}} \quad (2.45)$$

และค่าการสะท้อนของโครงสร้างหาได้จากกำลังสองของค่าสัมบูรณ์ของสัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่าเท่ากับ

$$R_D = \left| \frac{D_{21}}{D_{11}} \right|^2 \quad (2.46)$$

เช่นเดียวกันกับสัมประสิทธิ์การสะท้อน สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของโครงสร้างที่มีการเติมข้อบกพร่องกำหนดได้จากสมาชิกของเมทริกซ์ถ่ายโอนมีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$t_D = \frac{1}{D_{11}} \quad (2.47)$$

และค่าการส่งผ่านของโครงสร้างชนิดนี้มีค่าเท่ากับ

$$T_D = \left| \frac{1}{D_{11}} \right|^2 \quad (2.48)$$

เมื่อแสงตกกระทบบที่ผิวหน้าของ โครงสร้างที่มีการเติมข้อบกพร่องนี้ทำมุมใดๆ เทียบกับแกน z และ คำนึงถึงสิ่งแวดล้อมที่อยู่รอบ โครงสร้างชนิดนี้ได้แก่บริเวณผิวหน้าตกกระทบมีดรรชนีหักเหเท่ากับ n_0 และฐานรองของโครงสร้างนี้มีดรรชนีหักเหเท่ากับ n_s ดังนั้นค่าการสะท้อนในสมการ จึง เปลี่ยนเป็น

$$T_D = \frac{n_s \cos \theta_s}{n_0 \cos \theta_0} \left| \frac{1}{D_{11}} \right|^2 \quad (2.49)$$

สมการสุดท้ายนี้เป็นสมการที่ถูกลำไปใช้คำนวณค่าการส่งผ่านของโครงสร้างที่มีการเติมชั้น ข้อบกพร่องด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์

2.6 โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก

โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก คือ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงซึ่งเกิดจากการนำโลหะเข้ามาเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างดังที่กล่าวไว้ข้างต้น เมื่อพิจารณา โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงดังรูปที่ 2.6 ชั้นสารไดอิเล็กทริกที่มีความหนาเท่ากับ d_2 ถูกแทนที่ ด้วยชั้นโลหะทรานซิชัน เช่น เงิน, ทองคำ, ทองแดง, หรืออะลูมิเนียม เป็นต้น [4 – 6, 8 – 9, 16 – 21] เนื่องจากโลหะเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่คิอยู่แล้ว เมื่อมีการแทนที่ ชั้นไดอิเล็กทริกด้วยชั้นโลหะให้กับ โครงสร้าง โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง ส่งผลให้โครงสร้าง ชนิดนี้มีคุณสมบัติในการสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีขึ้น โดยได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับ คุณสมบัติการสะท้อนของโลหะพบว่าโลหะที่ถูกแบ่งเป็นแผ่นบางๆ และถูกจัดวางอย่างเป็นคาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สลับกับชั้นอากาศซึ่งถือว่าเป็นสาร ไดอิเล็กทริกให้คุณสมบัติการสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดึกว่าโลหะแบบเป็นก้อนที่มีความยาวเท่ากัน ในขณะที่เดียวกันเมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพบว่าเมื่อชั้นโลหะมีความหนาประมาณเท่ากับระยะที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่ผ่านโลหะก่อนจะสะท้อนออกไปแล้ว คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแพร่ผ่านชั้น โลหะนั้น ได้ดี

2.6.1 ทฤษฎีของโลหะ

การศึกษาถึงสมบัติเชิงแสงของโลหะเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อให้ทราบถึงปรากฏการณ์ทางทัศนศาสตร์เมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาตกกระทบกับวัสดุที่เป็นโลหะ สำหรับหัวข้อนี้จะกล่าวถึงสมบัติทางทัศนศาสตร์ของ โลหะที่ต้องนำมาใช้คำนวณหาคุณสมบัติสำหรับ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัล ไดอิเล็กทริกซึ่งได้แก่ สกินเคปท์ [4–5] และการระบุค่าครรชนหักเหเชิงซ้อนของโลหะ [4–5], [10, 13, 18, 20]

2.6.1.1 สกินเคปท์

โดยธรรมชาติแล้วเมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาตกกระทบที่ผิวโลหะ คลื่นดังกล่าวสามารถแพร่ผ่านเข้าไปในเนื้อโลหะได้เป็นระยะทางสั้นๆ ก่อนที่คลื่นจะสะท้อนออกไป โดยระยะทางสั้นๆ ดังกล่าวถูกเรียกว่า “สกินเคปท์” (Skin depth) ซึ่งสามารถระบุค่าของพารามิเตอร์นี้ได้จากระยะทางที่สนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าลดลงจนมีค่าเท่ากับ $1/e$ เมื่อเทียบกับขนาดสนามไฟฟ้าตกกระทบหรือถูกเขียนอยู่ในเทอมของความยาวคลื่นตกกระทบ (λ) และส่วนจินตภาพของครรชนหักเหของโลหะ (k) ดังสมการ

$$\delta = \frac{\lambda}{4\pi k} \quad (2.50)$$

ตัวอย่างเช่นเมื่อเลือกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบมีความยาวคลื่นเท่ากับ 500 นาโนเมตร และโลหะที่เลือกใช้เป็นเงินซึ่งมีส่วนจินตภาพของครรชนหักเหประมาณ 3 ดังนั้นเมื่อแทนค่าดังกล่าวลงในสมการ (2.42) ค่าสกินเคปท์ที่จึงมีค่าประมาณ 13 นาโนเมตร จึงสามารถกล่าวได้ว่าเมื่อชั้นโลหะมีความหนาน้อยกว่าค่าสกินเคปท์ของ โลหะนั้นค่านั้น ค่าการส่งผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ผ่านโลหะจะมีค่าสูงขึ้น

2.6.1.2 ค่าครรชนหักเหเชิงซ้อนของโลหะ

สำหรับโลหะซึ่งภายในประกอบด้วยอิเล็กตรอนอิสระ เมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าแก่วัสดุโลหะอิเล็กตรอนอิสระดังกล่าวจะไม่เกิดการกวัดแกว่งรอบๆอะตอมดังเช่นอิเล็กตรอนของสาร ไดอิเล็กทริก แต่จะมีการเคลื่อนที่อย่างอิสระตามทิศของสนามไฟฟ้างั้น สมการการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระตามแบบจำลองอิเล็กตรอนแบบดั้งเดิมสามารถเขียนได้เป็น

$$m \frac{d^2 X}{dt^2} + m\gamma \frac{dX}{dt} = -eE \quad (2.51)$$

เมื่อ X คือตำแหน่งของอิเล็กตรอนสัมพันธ์กับอะตอม, m คือมวลของอิเล็กตรอน, e คือค่าประจุของอิเล็กตรอน, และ $E = E_0 e^{i\omega t}$ คือสนามไฟฟ้า และผลเฉลยของสมการ (2.51) มีค่าเท่ากับ

$$X = \frac{eE_0}{m(\omega^2 - i\omega\gamma)} e^{i\omega t} \quad (2.52)$$

โดยไดโพลโมเมนต์ของอิเล็กตรอนภายในอะตอมมีค่าเท่ากับ

$$p = -eX = -\frac{e^2}{m(\omega^2 - i\omega\gamma)} E \quad (2.53)$$

จากสมการ (2.53) สามารถนิยามความสามารถในการโพลาไรซ์ของอะตอมโลหะหรือ α ได้เป็น

$$\alpha = \frac{e^2}{m(\omega^2 - i\omega\gamma)} \quad (2.54)$$

โดยดัชนีหักเหของวัสดุคือ $n^2 = 1 + \frac{N\alpha}{\epsilon_0}$ ดังนั้นดัชนีหักเหของโลหะจึงมีค่าเท่ากับ

$$n^2 = 1 - \frac{Ne^2}{m\epsilon_0(\omega^2 - i\omega\gamma)} \quad (2.55)$$

เมื่อ N คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในโลหะ

และประมาณว่า $\gamma \ll \omega$ จนสามารถทิ้งพจน์พารามิเตอร์นี้ได้ ค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนของโลหะตามสมการ (2.55) จึงมีค่าประมาณ

$$n^2 \approx 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (2.56)$$

โดย $\omega_p^2 = \frac{Ne^2}{m\epsilon_0}$ คือความถี่พลาสมา

เมื่อถอดรากลสมการ หาค่าครรชนีหักเหซึ่งพบว่าเป็นจำนวนเชิงซ้อนซึ่งถูกแสดงสำหรับ โลหะชนิดต่างๆ ดังตารางที่ 2.1 สำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูง (ย่านอัลตราไวโอเล็ต) หรือ $\omega > \omega_p$ มาตกกระทบครรชนีหักเหจะมีค่าเป็นจำนวนจริงและคลื่นสามารถแพร่ได้อย่างอิสระ แต่สำหรับคลื่นที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่พลาสมา (ย่านแสงที่ตามองเห็นและอินฟราเรด) หรือ $\omega < \omega_p$ ค่าครรชนีหักเหจะเป็นจำนวนจินตภาพ ดังนั้นภายในชั้น โลหะสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจึงมีค่า ลดลงเป็นฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียลกับระยะทางจากผิวตกกระทบ แต่เมื่อ γ มีค่าจำกัดครรชนีหักเห จึงมีค่าเป็นจำนวนเชิงซ้อน

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงค่าครรชนีหักเหเชิงซ้อนของ โลหะชนิดต่างๆ [10], [13]

โลหะ	ครรชนีหักเห	ความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ไมโครเมตร)							
		0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	4.0	10.0
Al	<i>n</i>	0.400	0.667	1.043	1.550	1.990	1.991	6.100	26.00
	<i>k</i>	4.450	5.573	6.568	7.000	7.050	9.300	30.40	67.30
Cu	<i>n</i>	-	0.880	0.186	0.150	0.170	0.197	1.940	10.52
	<i>k</i>	-	2.420	2.980	4.050	4.840	6.272	23.10	59.29
Au	<i>n</i>	-	0.840	0.200	0.131	0.149	0.179	2.040	11.50
	<i>k</i>	-	1.840	2.897	3.842	4.654	6.044	27.90	67.50
Pb	<i>n</i>	-	-	-	1.680	1.510	1.410	6.580	21.00
	<i>k</i>	-	-	-	3.670	4.240	5.400	20.80	37.40
Ag	<i>n</i>	0.075	0.050	0.060	0.075	0.090	0.250	2.340	10.80
	<i>k</i>	1.930	2.870	3.750	4.620	5.450	6.810	26.90	60.70

2.6.2 ค่าการสะท้อนและส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก

จากระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอนของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงและนำไปสู่การ คำนวณหาค่าการสะท้อนและการส่งผ่านของ โครงสร้างดังกล่าว สำหรับ โครงสร้างแถบช่องว่างทาง แสงแบบเมทัลโลไดอิเล็กทริกก็สามารถนำระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอนมาใช้ร่วมด้วยได้ เมื่อ พิจารณาโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงดังรูปที่ 2.6 เมื่อเปลี่ยนชั้น ไดอิเล็กทริกที่มีครรชนีหักเห n_2 เป็นชั้น โลหะแทนซึ่งจากการที่โลหะมีค่าครรชนีหักเหเป็นจำนวนเชิงซ้อน ดังนั้นครรชนีหักเหของ ชั้นนี้จึงเปลี่ยนเป็น $n_2 = n - ik$ ดังนั้นค่าการสะท้อนและการส่งผ่านของ โครงสร้างแถบช่องว่าง

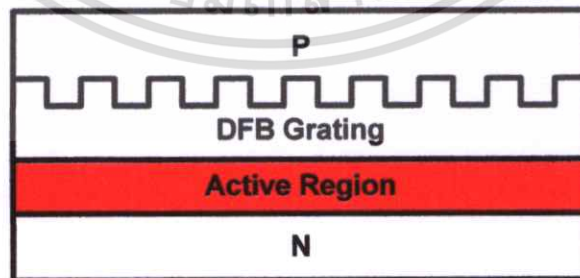
ทางแสงแบบเมทัลโล ไดอิเล็กทริกจึงมีค่าคงสมการ (2.37) และสมการ (2.40) เช่นเดิม เพียงแต่ค่า ครรชนหักเหของชั้นโลหะเป็นจำนวนเชิงซ้อน

2.6.3 สถานะบัพพร้อมของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก

จากการศึกษาถึงสถานะบัพพร้อมของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงในหัวข้อที่ 2.5 แล้ว สำหรับโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกก็ถูกนำมาศึกษาถึงผลกระทบเมื่อ มีการเติมขอบบัพพร้อมซึ่งในการศึกษานี้ขอบบัพพร้อมที่ถูกเติมลงไปเป็นสารไดอิเล็กทริกที่มีครรชนหักเหแตกต่างจากในโครงสร้างแบบเป็นคาบ โดยลักษณะโครงสร้างแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่มีการเติมชั้นขอบบัพพร้อมนั้นมีลักษณะเช่นเดียวกับกับรูปที่ 2.8 เพียงแต่เปลี่ยนค่าครรชนหักเหของชั้น ไดอิเล็กทริกชั้นที่ 2 เป็นจำนวนเชิงซ้อนหรือ $n_2 = n - ik$ เนื่องจากสารไดอิเล็กทริกชั้นนี้ถูกแทนที่ ด้วยชั้นโลหะ และ n_D คือครรชนหักเหของขอบบัพพร้อม ดังนั้นค่าการสะท้อนและการส่งผ่านของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล ไดอิเล็กทริกที่มีการเติมชั้นขอบบัพพร้อมนั้นสามารถหา ได้ด้วยสมการ (2.46) และ (2.49)

2.7 เลเซอร์สารกึ่งตัวนำแบบ DFB

โครงสร้างเลเซอร์แบบ DFB (Distributed Feedback Laser) [22], [24] คือเลเซอร์ที่มี โครงสร้างแบบเป็นคาบซึ่งประกอบขึ้นจากเกรตติงที่มีการเปลี่ยนแปลงครรชนหักเหภายในท่อนำ คลื่นแบบเป็นคาบและ โครงสร้างของเลเซอร์ชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 2.11 ข้อได้เปรียบของเลเซอร์ชนิด นี้คือสามารถเลือก โหมดเลเซอร์ที่ต้องการ ได้จากการเปลี่ยนแปลงความเป็นคาบของเกรตติงหรือ กระจกสะท้อนแบบแบรค (Bragg Reflector) เพื่อให้ได้โหมดเลเซอร์เอาท์พุทที่ต้องการออกมา



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของเลเซอร์แบบ DFB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาไดอะแกรมโครงสร้างเลเซอร์แบบ DFB ดังรูปที่ 2.11 จะเห็นเกรตติงแบบเป็นคาบอยู่เหนือบริเวณทำงาน (Active region) ของโครงสร้างเลเซอร์ซึ่งเกรตติงนี้ทำให้เกิดการคับปลิงของโหมดที่แพร่ภายในบริเวณทำงาน เมื่อสมการคับเปิดโหมดสำหรับเกรตติงแบบ DFB ซึ่งได้แก่

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} A(z) \\ B(z) \end{bmatrix} = i \begin{bmatrix} \Delta\beta & K_{ab} \\ K_{ba} & -\Delta\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A(z) \\ B(z) \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

โดย $A(z)$ และ $B(z)$ คือแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าที่มีการแพร่ในทิศทางเวิร์ดและแบคเวิร์ด

โดยผลเฉลยทั่วไปของสมการคับเปิดโหมดในสมการ (2.57) สามารถถูกเขียนในรูปแบบของผลรวมของโหมดไอเกนสองโหมดดังสมการ (2.58)

$$\begin{bmatrix} A(z) \\ B(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^+ \\ B^+ \end{bmatrix} e^{iqz} + \begin{bmatrix} A^- \\ B^- \end{bmatrix} e^{-iqz} \quad (2.58)$$

จากสมการ (2.58) แสดงให้เห็นว่าโหมดไอเกนของคลื่นแสงที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างแบบ DFB มีอยู่ 2 โหมดได้แก่โหมดไอเกน (+) หรือ e^{+iqz} และโหมดไอเกน (-) หรือ e^{-iqz} โดยค่าไอเกน (q) สำหรับทั้ง 2 โหมดไอเกนมีค่าตามสมการ

$$q = \sqrt{(\Delta\beta)^2 + K_{ab}K_{ba}} \quad (2.59)$$

เมื่อ $K_{ab} = \Gamma k_0 \Delta n \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi\right)$ และ $K_{ba} = -\Gamma k_0 \Delta n \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi\right)$ คือสัมประสิทธิ์การคับปลิงของเกรตติง และ $\Delta\beta = \beta_0 - \beta_p - i\frac{\alpha_n}{2}$ คือคิจินึงพารามิเตอร์ของเกรตติง

จากค่าไอเกนในโหมดไอเกนทั้งสองโหมด รวมทั้งสัมประสิทธิ์การคับปลิงของเกรตติงจึงสามารถนิยามค่าการส่งผ่านของเกรตติงแบบ DFB ที่มีความยาวเท่ากับ L ได้ตามสมการ

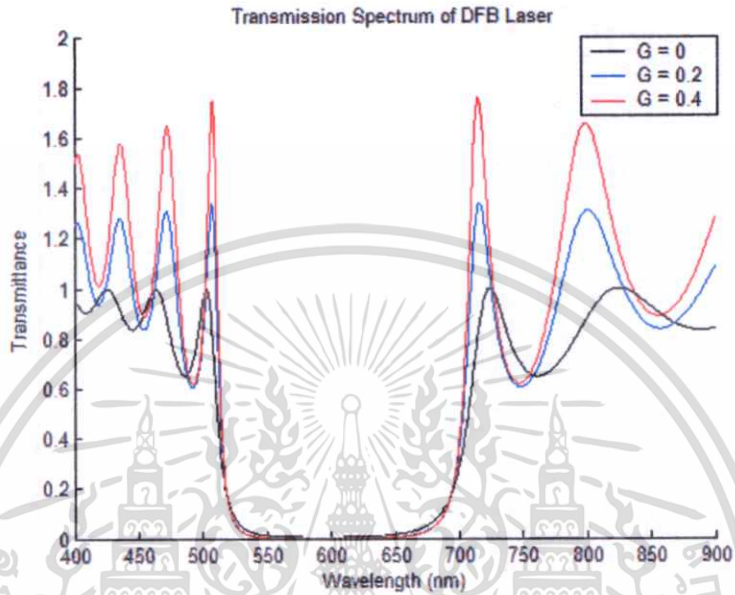
$$R = \left| \frac{-r_p (e^{iqL} - e^{-iqL})}{-r_p r_m e^{iqL} + e^{-iqL}} \right|^2 \quad (2.60)$$

และ

$$T = \left| \frac{1 - r_p r_m}{e^{-iqL} - r_p r_m e^{iqL}} \right|^2 \quad (2.61)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $r_p = \frac{K_{ab}}{\Delta\beta + q}$ และ $r_m = \frac{-K_{ab}}{\Delta\beta + q}$ คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนของโครงสร้างแบบ DFB สำหรับโหมดไอเกน (+) และโหมดไอเกน (-) ตามลำดับ และเมื่อนำค่าการส่งผ่านในสมการ (2.61) ไปพลอตหาสเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแบบ DFB ได้เป็นดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 สเปกตรัมการเกิดเลเซอร์ของโครงสร้าง DFB ที่มีอัตราขยายแตกต่างกัน [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 การออกแบบโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก

การศึกษาโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกในขั้นต้นจำเป็นต้องมีการออกแบบโครงสร้างชนิดนี้ให้สามารถสะท้อนและส่งผ่านช่วงความยาวคลื่นของแสงที่ต้องการได้โดยการกำหนดความยาวคลื่นศูนย์กลางของแถบช่องว่างทางแสงที่ต้องการและนำไปคำนวณย้อนกลับเพื่อหาความหนาของชั้น ไดอิเล็กทริกและ โลหะออกมา

3.1.1 การคำนวณหาความหนาของชั้นไดอิเล็กทริก

ความหนาของชั้น ไดอิเล็กทริกสามารถกำหนดได้จากค่าความยาวคลื่นศูนย์กลาง (λ_0) ของแถบช่องว่างทางแสงและค่าดัชนีหักเหของชนิดสาร ไดอิเล็กทริกที่เลือก โดยความหนาชั้น ไดอิเล็กทริกคำนวณได้จากสมการ

$$d_1 = \frac{\lambda_0}{2n} \quad (3.1)$$

เมื่อ d_1 คือความหนาของชั้น ไดอิเล็กทริกในหน่วยนาโนเมตร
 n คือค่าดัชนีหักเหของวัสดุที่ใช้เป็นชั้น ไดอิเล็กทริก

3.1.2 การคำนวณหาความหนาของชั้นโลหะ

เนื่องจากโลหะส่วนใหญ่มีคุณสมบัติการสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดี แต่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก็สามารถแพร่เข้าไปในเนื้อโลหะได้ระยะทางค่าหนึ่งซึ่งถูกเรียกว่า สกินเดปท์ ก่อนถูกสะท้อนออกไป ดังนั้นความหนาของชั้น โลหะจึงควรมีค่าประมาณสกินเดปท์ที่ความยาวคลื่นที่ต้องการสำหรับโลหะชนิดหนึ่งและเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ได้เป็น

$$d_2 \approx \delta = \frac{\lambda_0}{4\pi k} \quad (3.2)$$

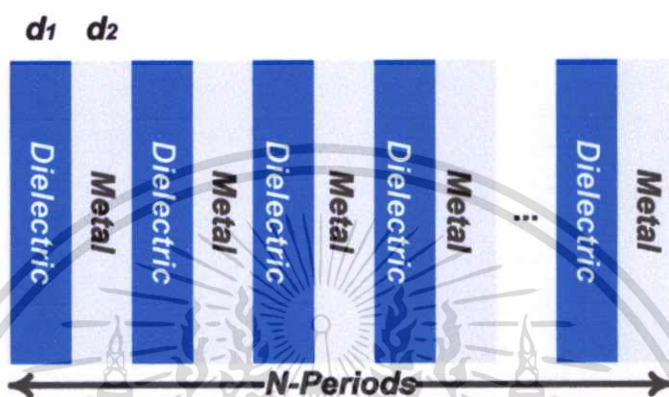
เมื่อ d_2 คือความหนาของชั้น โลหะในหน่วยนาโนเมตร

δ คือค่าสกินเดปท์ของโลหะชนิดใดๆในหน่วยนาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

k คือส่วนจินตภาพของครรชนีหักเหเชิงซ้อนของโลหะ

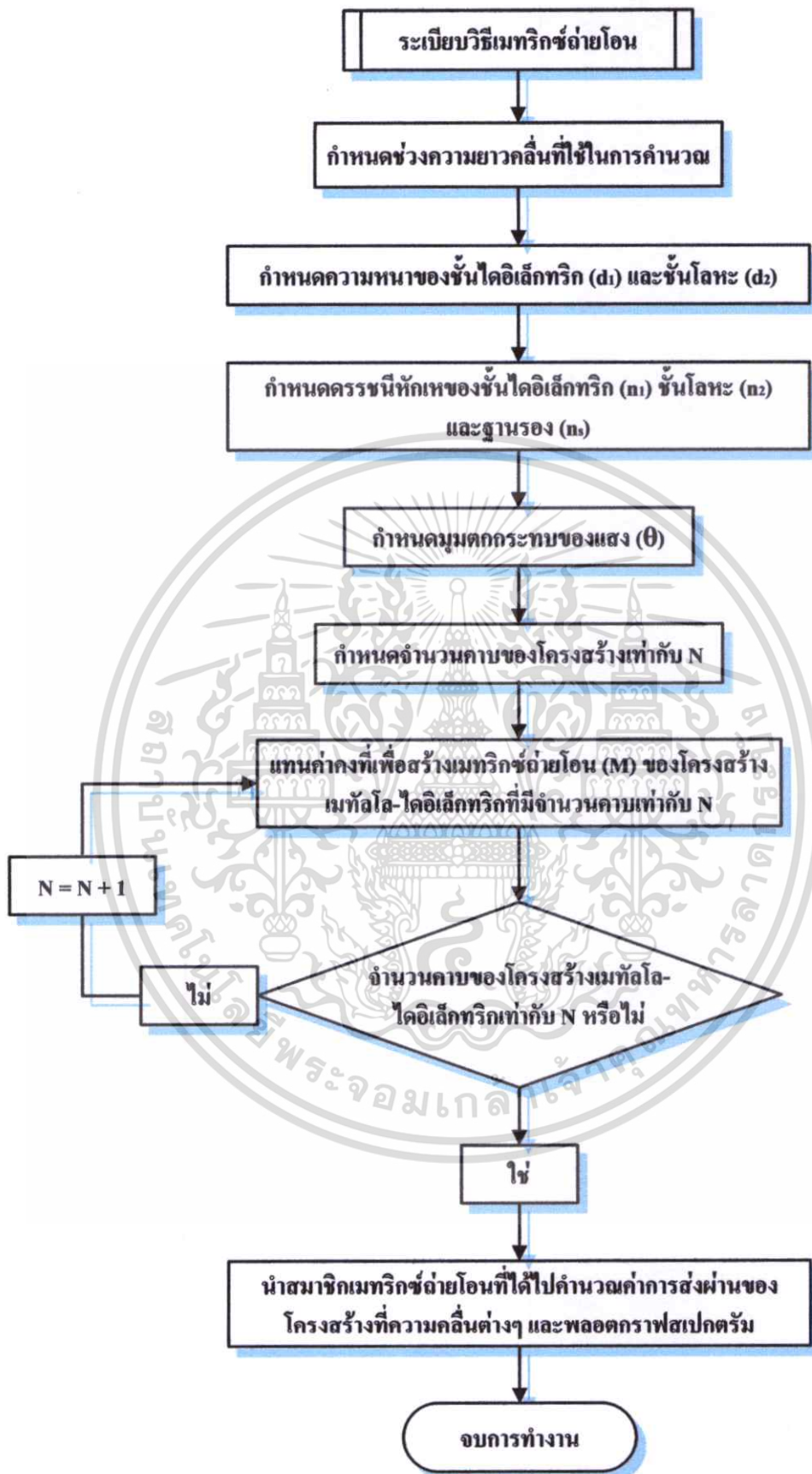
ซึ่งลักษณะของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกซึ่งมีความหนาของชั้นไดอิเล็กทริกและโลหะเป็น d_1 และ d_2 ตามลำดับ และมีจำนวนคาบของโครงสร้างเท่ากับ N ถูกแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่ถูกออกแบบ

3.2 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณค่าการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก

แผนผังการทำงานและลำดับขั้นตอนในการคำนวณแสดงในรูปที่ 3.2 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมเริ่มต้นจากการกำหนดค่าคงที่ต่างๆที่จำเป็นสำหรับการคำนวณ ได้แก่ ช่วงความยาวคลื่นที่พิจารณา, ความหนาและค่าครรชนีหักเหของชั้น ไดอิเล็กทริก, ความหนาและครรชนีหักเหของชั้น โลหะ, มุมตกกระทบของแสง และจำนวนคาบของโครงสร้าง เมื่อโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้รับการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แล้วจึงแทนค่าเหล่านี้ลงในสมการคำนวณโดยวนลูปการคำนวณตามจำนวนคาบของโครงสร้างที่กำหนดขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้จากคำนวณนี้คือเมทริกซ์ถ่ายโอนของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงทั้งหมด สุดท้ายโปรแกรมจะนำสมาชิกของเมทริกซ์ถ่ายโอนไปคำนวณเป็นค่าการส่งผ่านที่ความยาวคลื่นต่างๆ ตามสมการ 2.40 ได้ผลลัพธ์เป็นสเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่มีเงื่อนไขต่างๆ ดังแสดงไว้ในบทที่ 4



รูปที่ 3.2 แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่คำนวณด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์

ถ่ายโอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ขั้นตอนการศึกษาการเปรียบเทียบผลการคำนวณของโปรแกรมที่ออกแบบกับงานวิจัยที่ผ่านมา

การศึกษาในส่วนแรกเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคำนวณที่ได้ออกแบบไว้โดยทำการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณและผลการทดลองของสเปกตรัมการส่งผ่านที่ได้จากงานวิจัยที่นำมาอ้างอิง [21] โดยทำการเปรียบเทียบตัวอย่างโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก 5 แบบด้วยกัน ได้แก่ โครงสร้างแบบที่ 1, แบบที่ 1A, แบบที่ 2, แบบที่ 2A และแบบที่ 3 ซึ่งโครงสร้างแต่ละแบบมีความหนาของฟิล์มและเงื่อนไขการปลูกที่แตกต่างกัน โดยโครงสร้างทุกแบบเกิดจากการจัดเรียงของชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ (SiO_2) และเงิน (Ag) ซึ่งมีครรชนีหักเหเป็น $n_1 = 1.46$ และ $n_2 = 0.05 - 2.87i$ ตามลำดับ โดยขั้นตอนการศึกษาเป็นดังนี้

- 1) กำหนดช่วงความยาวคลื่นที่ใช้ในการพิจารณาเป็น 200 – 900 นาโนเมตร
- 2) กำหนดความหนาของชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ (d_1) และเงิน (d_2) สำหรับโครงสร้างแต่ละแบบให้มีค่าตามข้อมูลอ้างอิง [21] ได้แก่ โครงสร้างแบบที่ 1 มีความหนา d_1 และ d_2 เท่ากับ 257.6 และ 17 นาโนเมตรตามลำดับ, โครงสร้างแบบที่ 1A มีความหนา d_1 และ d_2 เท่ากับ 230 และ 17 นาโนเมตรตามลำดับ, โครงสร้างแบบที่ 2 และ 2A มีความหนา d_1 และ d_2 เท่ากับ 200 และ 8 นาโนเมตรตามลำดับ, โครงสร้างแบบที่ 3 มีความหนา d_1 และ d_2 เท่ากับ 200 และ 5 นาโนเมตรตามลำดับ
- 3) กำหนดวัสดุที่ใช้เป็นฐานรองเป็นกระจก ซึ่งมีครรชนีหักเหเท่ากับ 1.5
- 4) กำหนดมุมตกกระทบของแสงให้อยู่ในแนวเดียวกับเส้นปกติของระนาบตกกระทบ
- 5) กำหนดจำนวนคาบของโครงสร้างทุกแบบให้มีจำนวนคาบเท่ากับ 4
- 6) แทนค่าคงที่ต่างๆ ที่กำหนดจากข้อ 1) – 5) ลงในโปรแกรมเพื่อคำนวณและพลอตสเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแต่ละแบบขึ้นมาเพื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณและการทดลองที่นำมาอ้างอิง [21]

3.4 ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก

การศึกษาส่วนต่อมาก็คือการศึกษาสมบัติการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่มีเงื่อนไขของโครงสร้างที่แตกต่างกัน โดยเงื่อนไขของโครงสร้างที่นำมาศึกษาถึงผลกระทบต่อสมบัติการส่งผ่านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงไป ได้แก่ ความหนาของชั้น

ซัลฟอนไดออกไซด์ (d_1) และเงิน (d_2), มุมตกกระทบของแสง (θ) เมื่อเทียบกับเส้นปกติ, จำนวนคาบของโครงสร้าง (N), และชนิดวัสดุของฐานรอง โดยขั้นตอนการศึกษาเป็นดังนี้

3.4.1 ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการส่งผ่านเมื่อความหนาของชั้นซัลฟอนไดออกไซด์มีค่าต่างๆ

- 1) กำหนดความหนาของชั้นซัลฟอนไดออกไซด์ (d_1) มีค่าเป็น 102.74, 136.99, 171.23, 205.48 และ 239.73 นาโนเมตรตามลำดับ
- 2) กำหนดความหนาของเงิน (d_2) มีค่าเป็น 10 นาโนเมตร
- 3) กำหนดวัสดุของฐานรองเป็นอากาศ ($n_{\text{อากาศ}} = 1.00$)
- 4) กำหนดมุมตกกระทบของแสงให้อยู่ในแนวเดียวกับเส้นปกติของระนาบตกกระทบ
- 5) กำหนดจำนวนคาบของโครงสร้างให้มีจำนวนคาบเท่ากับ 5
- 6) แทนค่าคงที่ต่างๆ ที่กำหนดจากข้อ 1) – 5) ลงในโปรแกรมเพื่อคำนวณและพลอตสเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างในกรณีนี้

3.4.2 ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการส่งผ่านเมื่อความหนาของเงินมีค่าต่างๆ

- 1) กำหนดความหนาของชั้นซัลฟอนไดออกไซด์ (d_1) มีค่าเป็น 171.23 นาโนเมตร
- 2) กำหนดความหนาของเงิน (d_2) มีค่าเป็น 5, 10, 15, 20 และ 25 นาโนเมตร
- 3) กำหนดวัสดุของฐานรองเป็นอากาศ ($n_{\text{อากาศ}} = 1.00$)
- 4) กำหนดมุมตกกระทบของแสงให้อยู่ในแนวเดียวกับเส้นปกติของระนาบตกกระทบ
- 5) กำหนดจำนวนคาบของโครงสร้างให้มีจำนวนคาบเท่ากับ 5
- 6) แทนค่าคงที่ต่างๆ ที่กำหนดจากข้อ 1) – 5) ลงในโปรแกรมเพื่อคำนวณและพลอตสเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างในกรณีนี้

3.4.3 ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการส่งผ่านเมื่อมุมตกกระทบของแสงมีค่าต่างๆ

- 1) กำหนดความหนาของชั้นซัลฟอนไดออกไซด์ (d_1) มีค่าเป็น 171.23 นาโนเมตร
- 2) กำหนดความหนาของเงิน (d_2) มีค่าเป็น 10 นาโนเมตร
- 3) กำหนดวัสดุของฐานรองเป็นอากาศ ($n_{\text{อากาศ}} = 1.00$)
- 4) กำหนดมุมตกกระทบของแสงเมื่อเทียบกับเส้นปกติ (θ) มีค่าเป็น 0° , 30° , 45° และ 60°
- 5) กำหนดจำนวนคาบของโครงสร้างให้มีจำนวนคาบเท่ากับ 5
- 6) แทนค่าคงที่ต่างๆ ที่กำหนดจากข้อ 1) – 5) ลงในโปรแกรมเพื่อคำนวณและพลอตสเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างในกรณีนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4 ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการส่งผ่านเมื่อจำนวนคาบของโครงสร้างมีค่าต่างๆ

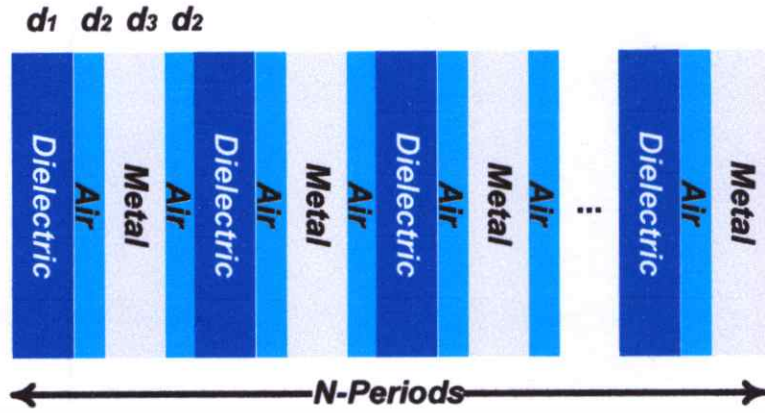
- 1) กำหนดความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (d_1) มีค่าเป็น 171.23 นาโนเมตร
- 2) กำหนดความหนาของเงิน (d_2) มีค่าเป็น 10 นาโนเมตร
- 3) กำหนดวัสดุของฐานรองเป็นอากาศ ($n_{\text{อากาศ}} = 1.00$)
- 4) กำหนดมุมตกกระทบของแสงให้อยู่ในแนวเดียวกับเส้นปกติของระนาบตกกระทบ
- 5) กำหนดจำนวนคาบของโครงสร้างให้มีจำนวนคาบเท่ากับ 5, 10, 15 และ 20 ตามลำดับ
- 6) แทนค่าคงที่ต่างๆ ที่กำหนดจากข้อ 1) – 5) ลงในโปรแกรมเพื่อคำนวณและพลอตสเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างในกรณีนี้

3.4.5 ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการส่งผ่านเมื่อนิควัสดุของฐานรองโครงสร้างต่างกัน

- 1) กำหนดความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (d_1) มีค่าเป็น 171.23 นาโนเมตร
- 2) กำหนดความหนาของเงิน (d_2) มีค่าเป็น 10 นาโนเมตร
- 3) กำหนดวัสดุของฐานรองเป็นอากาศ ($n_{\text{อากาศ}} = 1.00$), ทวอดซ์ ($n_{\text{ทวอดซ์}} = 1.5$), อลูมินา ($n_{\text{อลูมินา}} = 1.8$) และซิลิกอน ($n_{\text{ซิลิกอน}} = 3.5$) ตามลำดับ
- 4) กำหนดมุมตกกระทบของแสงให้อยู่ในแนวเดียวกับเส้นปกติของระนาบตกกระทบ
- 5) กำหนดจำนวนคาบของโครงสร้างให้มีจำนวนคาบเท่ากับ 5
- 6) แทนค่าคงที่ต่างๆ ที่กำหนดจากข้อ 1) – 5) ลงในโปรแกรมเพื่อคำนวณและพลอตสเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างในกรณีนี้

3.5 ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการส่งผ่านเมื่อคำนึงถึงชั้นอากาศระหว่างรอยต่อโลหะ-สารไดอิเล็กทริก

สำหรับการสร้างโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกในทางปฏิบัติ ซึ่งโครงสร้างที่ประดิษฐ์ขึ้นอาจมีชั้นอากาศแทรกอยู่ระหว่างรอยต่อโลหะกับสารไดอิเล็กทริกส่งผลให้ลักษณะโครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกดังแสดงในรูปที่ 3.1 มีลักษณะเปลี่ยนเป็นดังรูปที่ 3.3 ดังนั้นการคำนวณหาสมบัติส่งผ่านของโครงสร้างดังกล่าวจำเป็นต้องสร้างเมทริกซ์ถ่ายโอนชั้นใหม่ ซึ่งแตกต่างจากเมทริกซ์ถ่ายโอนของโครงสร้างในอุดมคติที่ไม่มีชั้นอากาศแทรกอยู่



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่มีชั้นอากาศแทรกอยู่ระหว่างรอยต่อโลหะกับสารไดอิเล็กทริก

โดยเมทริกซ์ถ่ายโอนที่แสดงลักษณะการถ่ายโอนของคลื่นแสงผ่าน โครงสร้าง 1 คาบ (ประกอบด้วยชั้นฉนวนไดออกไซด์/อากาศ/เงิน/อากาศ) สามารถสร้างได้เช่นเดียวกันเมทริกซ์ถ่ายโอนของโครงสร้างที่เกิดจากชั้นฉนวนไดออกไซด์/อากาศดังแสดงในหัวข้อที่ 2.4.2 และสมการเมทริกซ์ถ่ายโอนแสดงความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดสนามไฟฟ้าตกกระทบและแอมพลิจูดสนามไฟฟ้าส่งผ่านเมื่อจำนวนคาบของโครงสร้างมีค่าเท่ากับ N ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} A_0 \\ B_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_N \\ B_N \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

โดย $\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \left[D_1 P_1 D_1^{-1} D_2 P_2 D_2^{-1} D_3 P_3 D_3^{-1} D_2 P_2 D_2^{-1} \right]^N$

เมื่อ D_1 , D_2 และ D_3 คือเมทริกซ์พลวัตของชั้นฉนวนไดออกไซด์, อากาศ และเงินตามลำดับโดยสามารถหาค่าได้เช่นเดียวกันกับสมการ (2.8) สำหรับคลื่นโพลาไรซ์แบบ s และ (2.13) สำหรับคลื่นโพลาไรซ์แบบ p และ P_1 , P_2 และ P_3 คือเมทริกซ์การแพร่ของชั้นฉนวนไดออกไซด์, อากาศ และเงินตามลำดับ โดยสามารถหาค่าได้เช่นเดียวกันกับสมการ (2.26)

สำหรับการหาค่าการสะท้อนและการส่งผ่านของโครงสร้างในรูปที่ 3.3 สามารถหาได้จากสมการเมทริกซ์ถ่ายโอนและสมการ (2.37) สำหรับค่าการสะท้อนและสมการ (2.40) สำหรับค่าการส่งผ่านของโครงสร้าง โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณในหัวข้อนี้สามารถใช้

โปรแกรมเดียวกันกับในหัวข้อที่ผ่านมา แต่เพิ่มเมทริกซ์พลวัตและเมทริกซ์การแพร่ของชั้นอากาศให้กับโปรแกรม และทำการศึกษาตามขั้นตอนต่อไปนี้

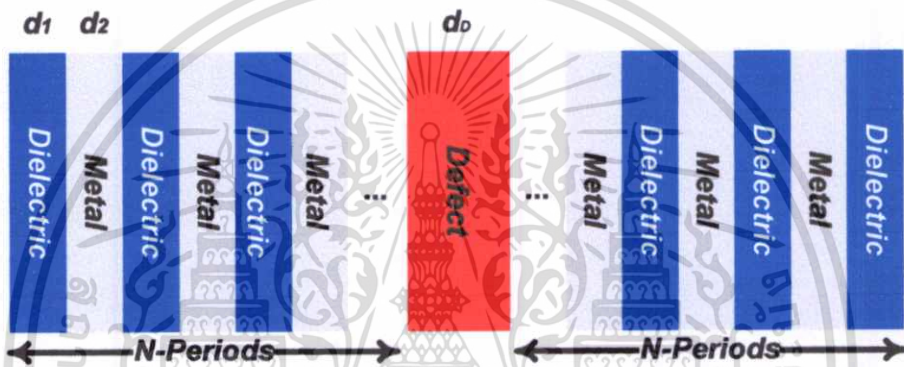
- 1) กำหนดความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (d_1) มีค่าเป็น 171.23 นาโนเมตร
- 2) กำหนดความหนาของชั้นอากาศ (d_2) ระหว่างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์และเงินมีค่าเป็น 5, 10, 15 และ 20 นาโนเมตรตามลำดับ
- 3) กำหนดความหนาของเงิน (d_3) มีค่าเป็น 10 นาโนเมตร
- 4) กำหนดวัสดุของฐานรองเป็นอากาศ ($n_{\text{อากาศ}} = 1.00$)
- 5) กำหนดมุมตกกระทบของแสงให้อยู่ในแนวเดียวกับเส้นปกติของระนาบตกกระทบ
- 6) กำหนดจำนวนคาบของโครงสร้างให้มีจำนวนคาบเท่ากับ 5
- 7) แทนค่าคงที่ต่างๆ ที่กำหนดจากข้อ 1) – 6) ลงในโปรแกรมเพื่อคำนวณและพลอตสเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างในกรณีนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

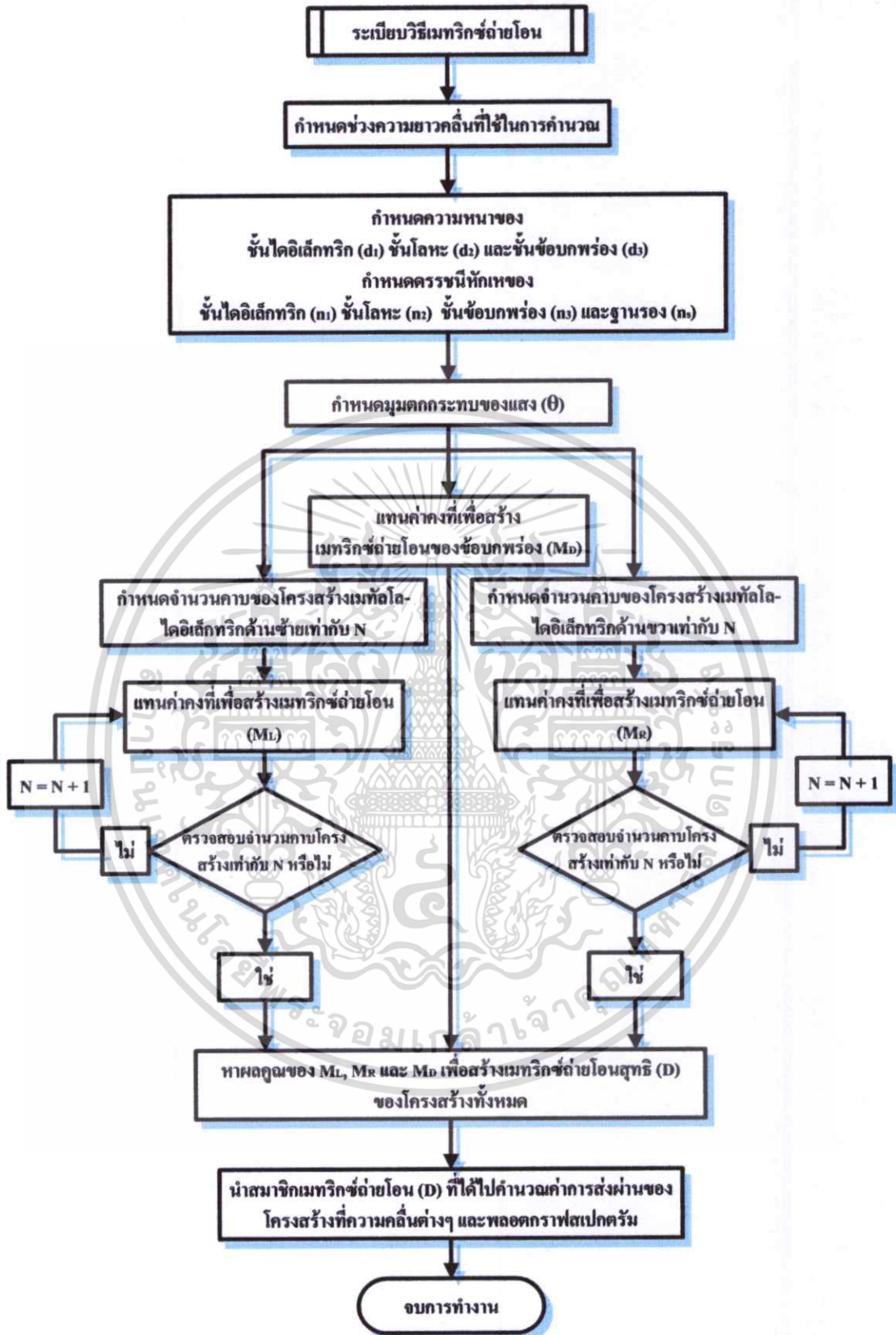
3.6 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณค่าการส่งผ่านของสถานะบัพพร้อมของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก

หัวข้อต่อมาคือการออกแบบ โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณหาสเปกตรัมการส่งผ่านของสถานะบัพพร้อมของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เกิดจากการจัดเรียงตัวสลับกันของชั้น ไดอิเล็กทริกและ โลหะซึ่งมีความหนาเป็น d_1 และ d_2 ตามลำดับแต่มีชั้นข้อบกพร่องซึ่งมีความหนา d_D แทรกเพิ่มเข้ามาในโครงสร้าง โดยมีลักษณะโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ลักษณะสถานะบัพพร้อมของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก

ลักษณะแผนผังการทำงานและลำดับขั้นตอนในการคำนวณของโครงสร้างในรูปที่ 3.4 แสดงในรูปที่ 3.5 โดยเริ่มต้นจากการกำหนดค่าคงที่ต่างๆ ได้แก่ ช่วงความยาวคลื่นที่พิจารณา, ความหนาและค่าครรรณีหักเหของชั้น ไดอิเล็กทริก, โลหะ, ชั้นข้อบกพร่องและฐานรอง, มุมตกกระทบของแสง และจำนวนคาบของโครงสร้าง เมื่อโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้รับการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แล้วจึงแทนค่าเหล่านี้ลงในสมการคำนวณ โดยวนลูปการคำนวณเพื่อหาเมทริกซ์ถ่ายโอนของโครงสร้างแต่ละส่วนแยกจากกันเป็น M_L , M_R และ M_D และผลคูณของเมทริกซ์ทั้งสามคือเมทริกซ์ถ่ายโอนสุทธิ (D) ของโครงสร้างนี้ สุดท้ายจะนำสมาชิกของ D ไปคำนวณเป็นค่าการส่งผ่านตามสมการ 2.49 ได้ผลลัพธ์เป็นสเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่มีชั้นข้อบกพร่องดังแสดงไว้ในบทที่ 4



รูปที่ 3.5 แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่คำนวณด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์

ส่งผ่านสำหรับโครงสร้างที่มีการเติมชั้นข้อบกพร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการส่งผ่านของสถานะบัพพร้อมของโครงสร้างแถบ ช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก

3.7.1 ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการส่งผ่านในกรณีที่ความหนาของชั้นบัพพร้อมมีค่าต่างๆ

- 1) กำหนดให้ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ใน โครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกทางด้านซ้ายและขวามีความหนา (d_1) เท่ากับ 171.23 นาโนเมตรและมีดรรชนีหักเห (n_1) เท่ากับ 1.46
- 2) กำหนดให้ชั้นเงินใน โครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกทางด้านซ้ายและขวามีความหนา (d_2) เท่ากับ 10 นาโนเมตรและมีดรรชนีหักเห (n_2) เท่ากับ $0.05 - 2.87i$
- 3) กำหนดจำนวนคาบของ โครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกแบบเป็นคาบทางด้านซ้ายและขวาให้มีจำนวนคาบเท่ากับ 5
- 4) กำหนดให้ชั้นบัพพร้อมที่เติมให้กับ โครงสร้างเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกแบบเป็นคาบ คือ ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีความหนามากกว่าชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ชั้นอื่นๆหรือ d_0 เท่ากับ 400, 450 และ 550 นาโนเมตร
- 5) กำหนดมุมตกกระทบของแสงให้อยู่ในแนวเดียวกับเส้นปกติของระนาบตกกระทบ
- 6) กำหนดวัสดุของฐานรองเป็นอากาศ ($n_{\text{อากาศ}} = 1.00$)
- 7) แทนค่าคงที่ต่างๆ ที่กำหนดจากข้อ 1) – 6) ลงในโปรแกรมเพื่อคำนวณและพลอตสเปกตรัมการส่งผ่านของ โครงสร้างชนิดนี้

3.7.2 ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการส่งผ่านในกรณีที่มีข้อบัพพร้อมต่างชนิดกัน

- 1) กำหนดให้ชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ใน โครงสร้างเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกทางด้านซ้ายและขวามีความหนา (d_1) เท่ากับ 171.23 นาโนเมตรและมีดรรชนีหักเห (n_1) เท่ากับ 1.46
- 2) กำหนดให้ชั้นเงินใน โครงสร้างเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกทางด้านซ้ายและขวามีความหนา (d_2) เท่ากับ 10 นาโนเมตรและมีดรรชนีหักเห (n_2) เท่ากับ $0.05 - 2.87i$
- 3) กำหนดจำนวนคาบของ โครงสร้างเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกแบบเป็นคาบทางด้านซ้ายและขวาให้มีจำนวนคาบเท่ากับ 5
- 4) กำหนดให้ชั้นบัพพร้อมที่เติมให้กับ โครงสร้างเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกแบบเป็นคาบ คือ ชั้นของอากาศ, แมกนีเซียมไดฟลูออไรด์และซิลิกอน ไดออกไซด์ซึ่งมีความหนาหรือ d_0 เท่ากับ 400 นาโนเมตร
- 5) กำหนดมุมตกกระทบของแสงให้อยู่ในแนวเดียวกับเส้นปกติของระนาบตกกระทบ
- 6) กำหนดวัสดุของฐานรองเป็นอากาศ ($n_{\text{อากาศ}} = 1.00$)

7) แทนค่าคงที่ต่างๆ ที่กำหนดจากข้อ 1) – 6) ลงในโปรแกรมเพื่อคำนวณและพลอตสเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างชนิดนี้

3.7.3 ขั้นตอนการศึกษาค่าการส่งผ่านในกรณีที่มีจำนวนคาบของโครงสร้างแตกต่างกัน

1) กำหนดให้ชั้นฉลิกอนไดออกไซด์ในโครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกทางด้านซ้ายและขวามีความหนา (d_1) เท่ากับ 171.23 นาโนเมตร และมีครรชนหักเห (n_1) เท่ากับ 1.46

2) กำหนดให้ชั้นเงินในโครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกทางด้านซ้ายและขวามีความหนา (d_2) เท่ากับ 10 นาโนเมตร และมีครรชนหักเห (n_2) เท่ากับ $0.05 - 2.87i$

3) กำหนดจำนวนคาบของโครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกแบบเป็นคาบทางด้านซ้ายและขวาให้มีจำนวนคาบเท่ากับ 2, 3, 4, 5 และ 6 ตามลำดับ

4) กำหนดให้ชั้นบัพรองที่เติมให้กับโครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกแบบเป็นคาบ คือชั้นฉลิกอนไดออกไซด์ที่มีความหนาเป็นสองเท่าเมื่อเทียบกับชั้นฉลิกอนไดออกไซด์อื่นหรือ d_D เท่ากับ 450 นาโนเมตร

5) กำหนดมุมตกกระทบของแสงให้อยู่ในแนวเดียวกับเส้นปกติของระนาบตกกระทบ

6) กำหนดวัสดุของฐานรองเป็นอากาศ ($n_{\text{อากาศ}} = 1.00$)

7) แทนค่าคงที่ต่างๆ ที่กำหนดจากข้อ 1) – 6) ลงใน โปรแกรมเพื่อคำนวณและพลอตสเปกตรัมการส่งผ่านของ โครงสร้างชนิดนี้

บทที่ 4

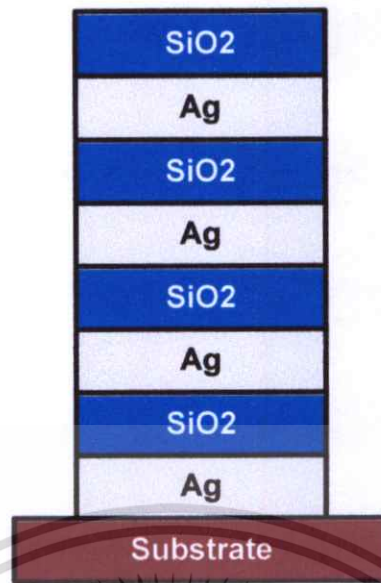
ผลการคำนวณ

4.1 การเปรียบเทียบผลการคำนวณของโปรแกรมที่ออกแบบกับงานวิจัยที่ผ่านมา

เนื่องจากจุดเริ่มต้นของการศึกษานี้มาจากวิทยานิพนธ์ของคุณชัชวีร์ เอลิซาเบธนักศึกษาปริญญาโทจาก University of Dayton ประเทศสหรัฐอเมริกา [21] ซึ่งเป็นการสร้างโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกด้วยเทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง โดยวัสดุที่ถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของโครงสร้าง ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และเงิน (Ag) และตัวอย่างโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่ถูกสร้างขึ้นมีด้วยกัน 5 แบบ ได้แก่ โครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกแบบที่ 1, แบบที่ 1A, แบบที่ 2, แบบที่ 2A และแบบที่ 3 โดยลักษณะของโครงสร้างถูกแสดงดังรูปที่ 4.1 และตัวอย่างโครงสร้างทั้งหมดนี้เกิดจากคู่ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์และเงินจำนวน 4 คู่ซึ่งแต่ละแบบชั้นตัวกลางมีความหนาแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4.1 รวมทั้งเงื่อนไขในกระบวนการปลูกฟิล์มที่แตกต่างกัน โดยในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบผลการคำนวณสเปกตรัมการส่งผ่านของโปรแกรมที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นกับผลทางทฤษฎีที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปที่มีชื่อเรียกว่า LIGHTS และผลการทดลองของวิทยานิพนธ์ที่นำมาอ้างอิง เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 4.1 แสดงความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (d_1) และเงิน (d_2) ภายในโครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่นำมาอ้างอิง

โครงสร้างแบบที่	ความหนาของซิลิกอนไดออกไซด์ d_1 (นาโนเมตร)	ความหนาของเงิน d_2 (นาโนเมตร)
1	257.6	17
1A	230	17
2	200	8
2A	200	8
3	200	5



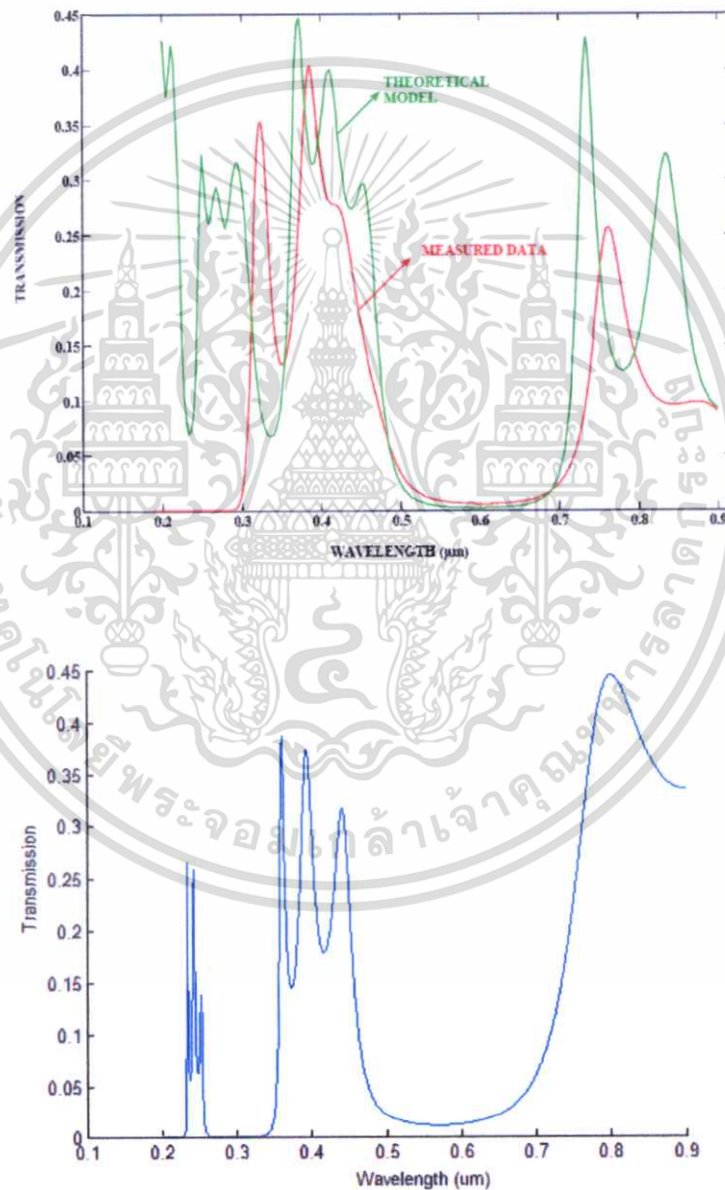
รูปที่ 4.1 ลักษณะโครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่ใช้ในการทดสอบความถูกต้องในการคำนวณของโปรแกรมคอมพิวเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 ผลการคำนวณของโครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกแบบที่ 1

โครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกแบบที่ 1 เป็นโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกซึ่งเกิดจากคู่ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์และเงินจำนวน 4 คู่ ซึ่งมีความหนาเท่ากับ 257.6 นาโนเมตรและ 17 นาโนเมตรตามลำดับ และสเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแบบที่ 1 ที่ได้จากโปรแกรม LIGHTS, ผลการทดลองจริง [21] และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.2

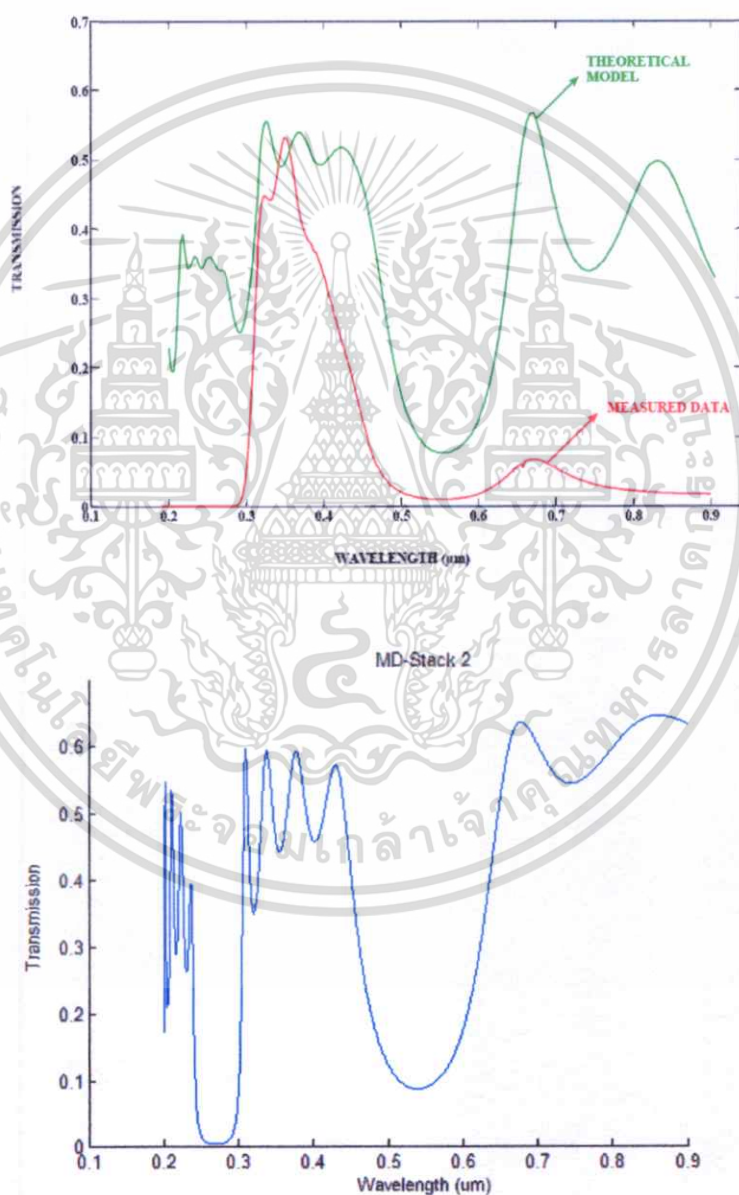


รูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกแบบที่ 1 จากข้อมูลอ้างอิง [21] และจากผลการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของผู้วิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ผลการคำนวณของโครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกแบบที่ 2

โครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกแบบที่ 2 เป็นโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกซึ่งเกิดจากคู่ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์และเงินจำนวน 4 คู่ ซึ่งมีความหนาเท่ากับ 200 นาโนเมตรและ 8 นาโนเมตรตามลำดับ และสเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแบบที่ 2 ที่ได้จากโปรแกรม LIGHTS, ผลการทดลองจริง [21] และ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.4

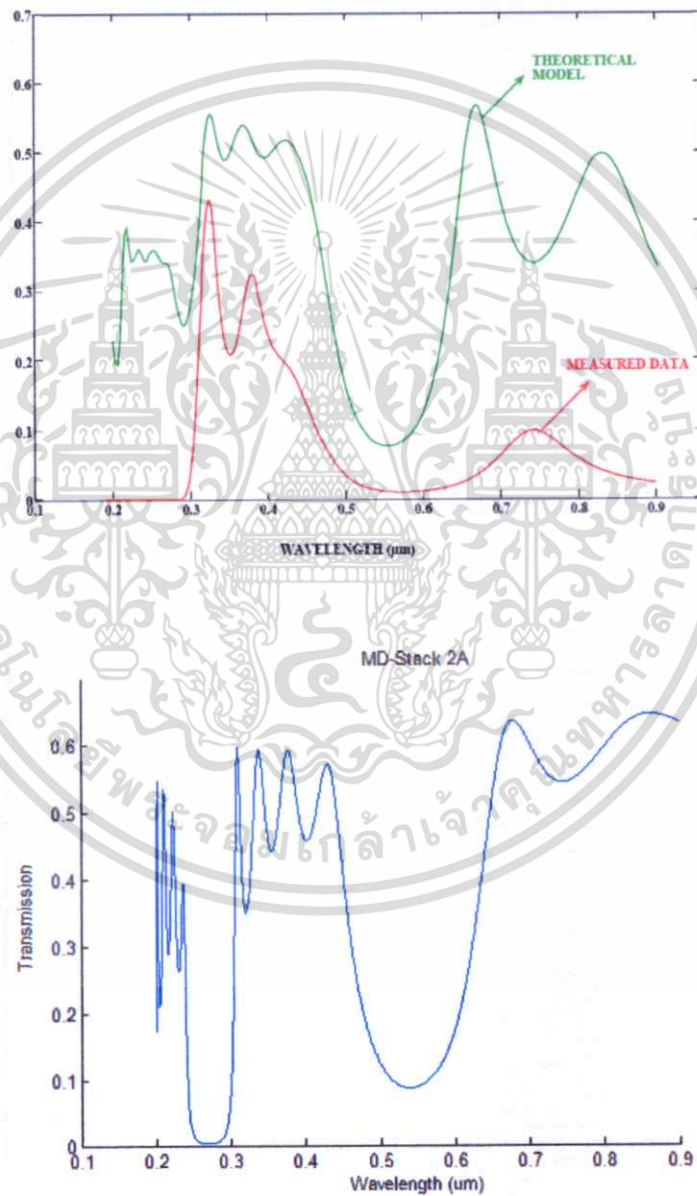


รูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกแบบที่ 2 จากข้อมูลอ้างอิง[21] และจากผลการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของผู้วิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 ผลการคำนวณของโครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกแบบที่ 2A

โครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกแบบที่ 2A เป็นโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกซึ่งเกิดจากคู่ชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์และเงินจำนวน 4 คู่ ซึ่งมีความหนาเท่ากับ 200 นาโนเมตรและ 8 นาโนเมตรตามลำดับ และสเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแบบที่ 2A ที่ได้จากโปรแกรม LIGHTS, ผลการทดลองจริง [21] และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.5

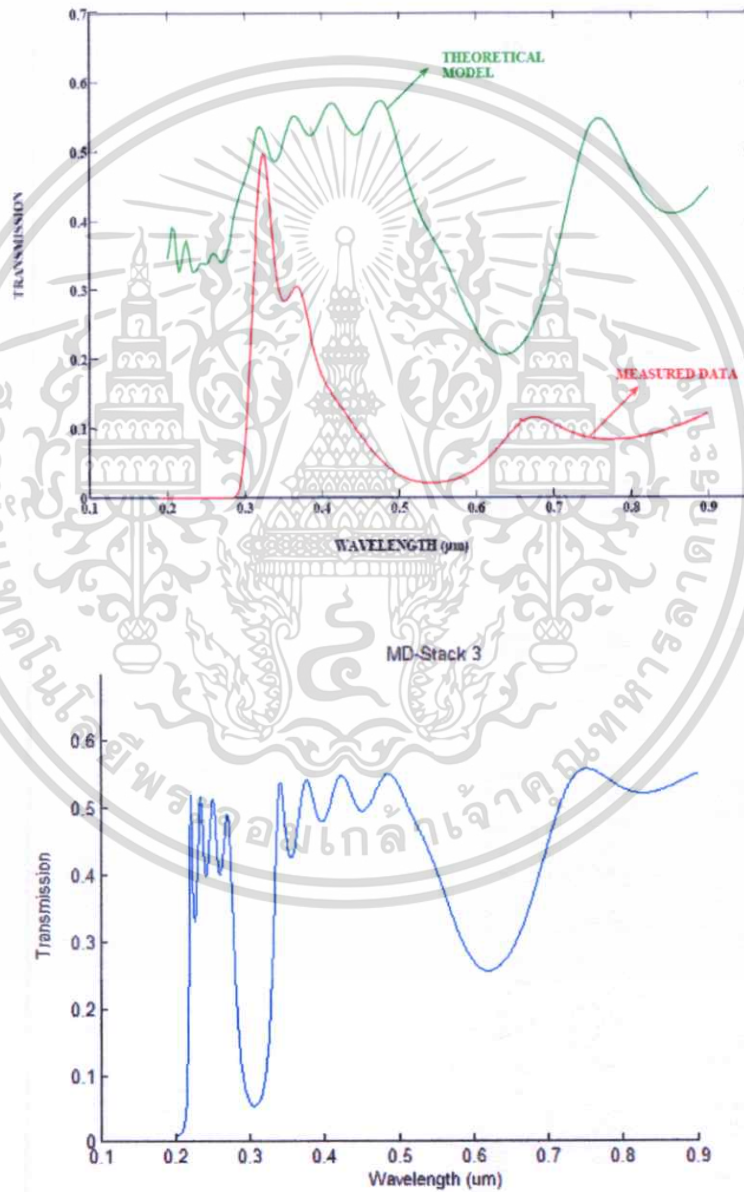


รูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านของ โครงสร้างเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกแบบที่ 2A จากข้อมูลอ้างอิง [21] และจากผลการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของผู้วิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 ผลการคำนวณของโครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกแบบที่ 3

โครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกแบบที่ 3 เป็นโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกซึ่งเกิดจากคู่ชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์และเงินจำนวน 4 คู่ ซึ่งมีความหนาเท่ากับ 200 นาโนเมตรและ 5 นาโนเมตรตามลำดับ และสเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแบบที่ 3 ที่ได้จากโปรแกรม LIGHTS, ผลการทดลองจริง [21] และ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านของ โครงสร้างเมทัล โล-ไดอิเล็กทริกแบบที่ 3 จากข้อมูลอ้างอิง [21] และจากผลการคำนวณด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์ของผู้วิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการเปรียบเทียบสเปกตรัมการส่งผ่านที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ผู้วิจัย ออกแบบขึ้นกับผลจากโปรแกรม LIGHTS และผลการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิง [21] พบว่า สำหรับโครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกแบบที่ 1 และ 1A สเปกตรัมการส่งผ่านในรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.3 ผลจากโปรแกรม LIGHTS (เส้นสีเขียว) และผลการทดลอง (เส้นสีแดง) จากข้อมูลอ้างอิงมี ตำแหน่งของแถบช่องว่างทางแสงทับกันพอดีแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างทั้ง 2 แบบที่สร้างขึ้นมี ลักษณะใกล้เคียงกับโครงสร้างในอุดมคติที่ถูกออกแบบไว้ และเมื่อนำสเปกตรัมการส่งผ่านของ โครงสร้างแบบที่ 1 และ 1A ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ผู้วิจัยออกแบบขึ้นเอง (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับสเปกตรัมการส่งผ่านจากโปรแกรม LIGHTS (เส้นสีเขียว) พบว่าตำแหน่งศูนย์กลาง ของแถบช่องว่างทางแสงตรงกันที่ตำแหน่ง 600 นาโนเมตรและเกิดขึ้นในช่วง 500 – 700 นาโน เมตรเช่นกัน

ต่อมาเปรียบเทียบสเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกแบบที่ 2 และ 2A ซึ่งจากตารางที่ 4.1 พบว่าความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์และเงินของโครงสร้างทั้ง 2 แบบมีค่าเท่ากัน แต่ความแตกต่างของโครงสร้างทั้งสองแบบนี้คือเงื่อนไขของกระบวนการปลูกฟิล์ม โครงสร้างทั้งคู่แตกต่างกัน ได้แก่ กำลังของคลื่นอาร์เอฟที่ใช้ในการสเปกโตรริงและความดัน ก๊าซของกระบวนการปลูกฟิล์ม เมื่อคำนวณสเปกตรัมการส่งผ่านจากโปรแกรม LIGHTS (เส้นสีเขียว) สำหรับโครงสร้างแบบที่ 2 และ 2A ให้ลักษณะสเปกตรัมที่เหมือนกัน เช่นเดียวกับ ลักษณะสเปกตรัมที่ได้จากโปรแกรมคำนวณที่ผู้วิจัยออกแบบขึ้นเอง (เส้นสีน้ำเงิน) ซึ่งมีตำแหน่ง ศูนย์กลางของแถบช่องว่างทางแสงตรงกันที่ประมาณ 550 นาโนเมตร แต่เมื่อนำสเปกตรัมการ ส่งผ่านจากโปรแกรม LIGHTS และ โปรแกรมที่ผู้วิจัยออกแบบขึ้นเองเปรียบเทียบกับผลการทดลอง จริง (เส้นสีแดง) พบว่าโครงสร้างจริงให้ตำแหน่งแถบช่องว่างทางแสงตรงกันที่ 550 นาโนเมตร แต่ ลักษณะของสเปกตรัมการส่งผ่านแตกต่างกับผลการคำนวณมาก เนื่องจากโครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกแบบที่ 2 และ 2A ที่สร้างขึ้นจริงอาจมีความหนาของฟิล์มไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งโครงสร้าง ทำให้โครงสร้างที่ได้ไม่ใช่โครงสร้างแบบเป็นคาบ และสำหรับโครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก แบบที่ 3 ผลการคำนวณสเปกตรัมการส่งผ่านจากโปรแกรม LIGHTS (เส้นสีเขียว) และ โปรแกรมที่ ผู้วิจัยออกแบบขึ้นเอง (เส้นสีน้ำเงิน) พบว่าตำแหน่งแถบช่องว่างทางแสงที่เกิดขึ้นในช่วงความ ยาวคลื่น 600 – 700 นาโนเมตรเช่นกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง (เส้นสีแดง) จะเห็นว่า ตำแหน่งของแถบช่องว่างทางแสงกลับอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 500 – 600 นาโนเมตรแทน ซึ่งสาเหตุ ของความแตกต่างนี้อาจเกิดจากความหนาของชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นตัวกำหนด ตำแหน่งของแถบช่องว่างทางแสงที่ปลูกขึ้นจริงไม่เท่ากับค่าความหนาที่ได้ออกแบบไว้

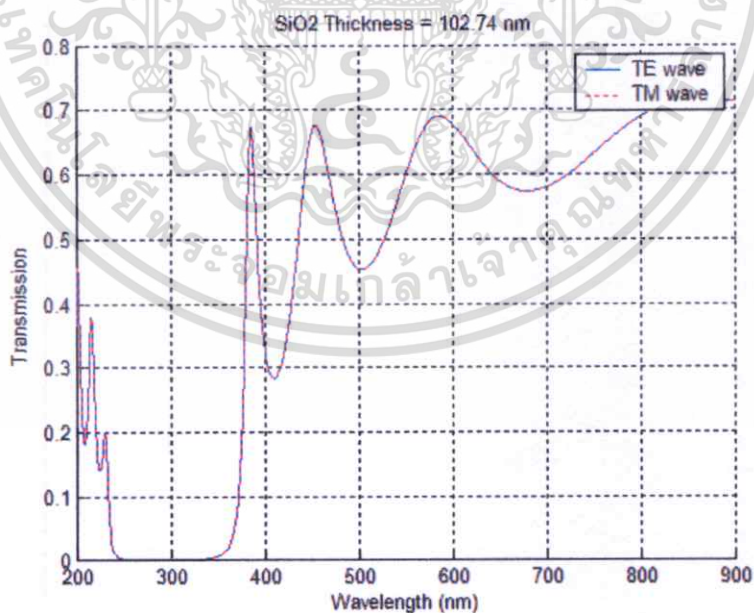
และจากผลการคำนวณสเปกตรัมการส่งผ่านจาก โปรแกรม LIGHTS และ โปรแกรมที่ผู้วิจัย ออกแบบขึ้นเองดังแสดงในรูปที่ 4.2 ถึงรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ผู้วิจัย ออกแบบขึ้นเองนั้นให้ผลการคำนวณที่ถูกต้องแม่นยำและมีความน่าเชื่อถือ

4.2 สมบัติการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก

ในส่วนที่สองเป็นการศึกษาถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติการส่งผ่านของโครงสร้างช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก โดยทำการคำนวณหาการส่งผ่านเมื่อโครงสร้างดังกล่าวมีเงื่อนไขของโครงสร้างบางอย่างที่แตกต่างกัน ได้แก่ ความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์และเงิน, มุมตกกระทบของลำแสง, จำนวนคาบของโครงสร้าง, และชนิดวัสดุของฐานรอง (Substrate) เงื่อนไขต่างๆเหล่านี้ถูกแทนค่าและคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้น

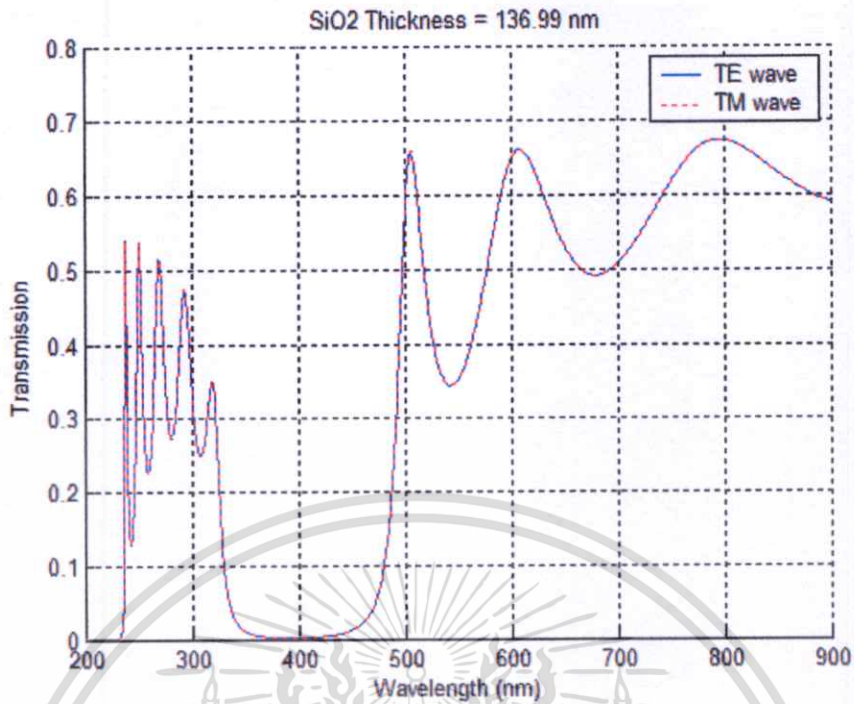
4.2.1 สมบัติการส่งผ่านเมื่อความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์มีค่าต่างๆ

ในการคำนวณส่วนแรกทำการศึกษาผลกระทบของค่าการส่งผ่านเมื่อความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) มีค่าต่างๆ ได้แก่ 102.74, 136.99, 171.23, 205.48 และ 239.73 นาโนเมตรตามลำดับ โดยความหนาของชั้นเงินเท่ากับ 10 นาโนเมตร จำนวนคาบของโครงสร้างเท่ากับ 5 คาบ มุมตกกระทบของแสงมีค่าเป็น 0 องศาและเลือกอากาศเป็นฐานรองของโครงสร้างเพื่อพิสูจน์ว่าความหนาของชั้น ไดอิเล็กทริกมีผลต่อตำแหน่งของแถบช่องว่างทางแสง ซึ่งผลการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4.7 ถึง 4.11

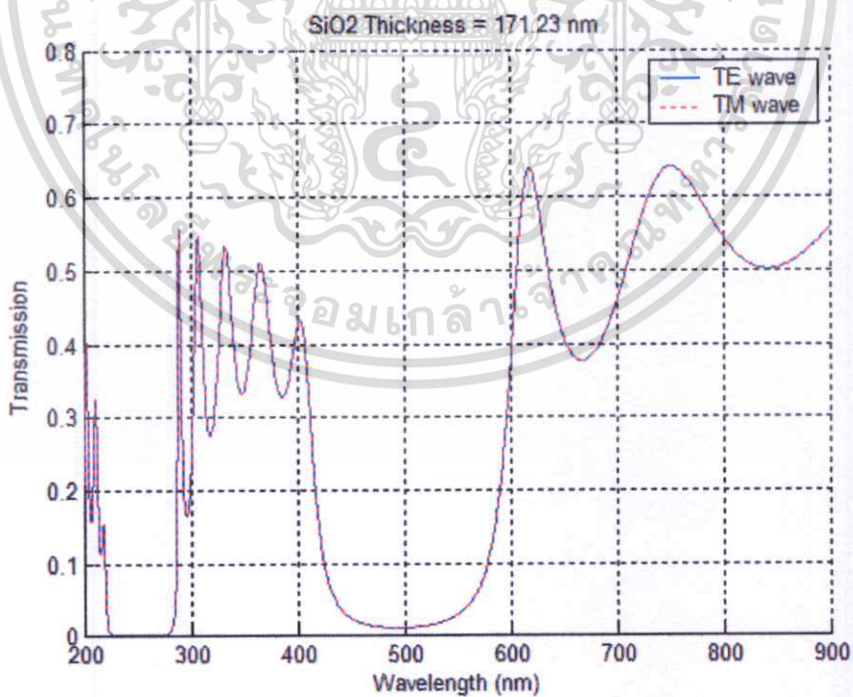


รูปที่ 4.7 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่มีความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์เท่ากับ 102.74 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

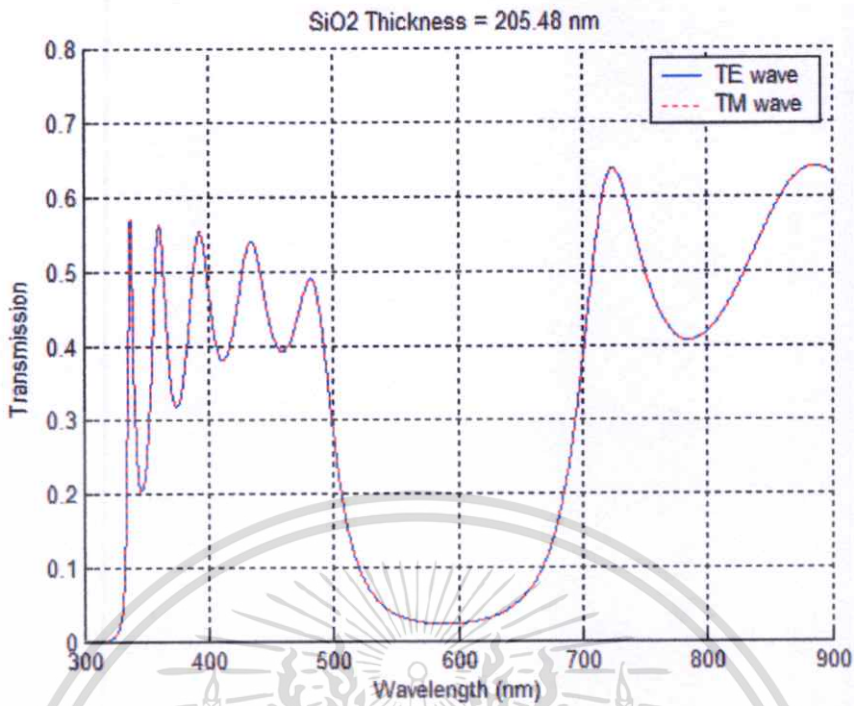


รูปที่ 4.8 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทาดิล-ไดอิเล็กทริกที่มี ความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์เท่ากับ 136.99 นาโนเมตร

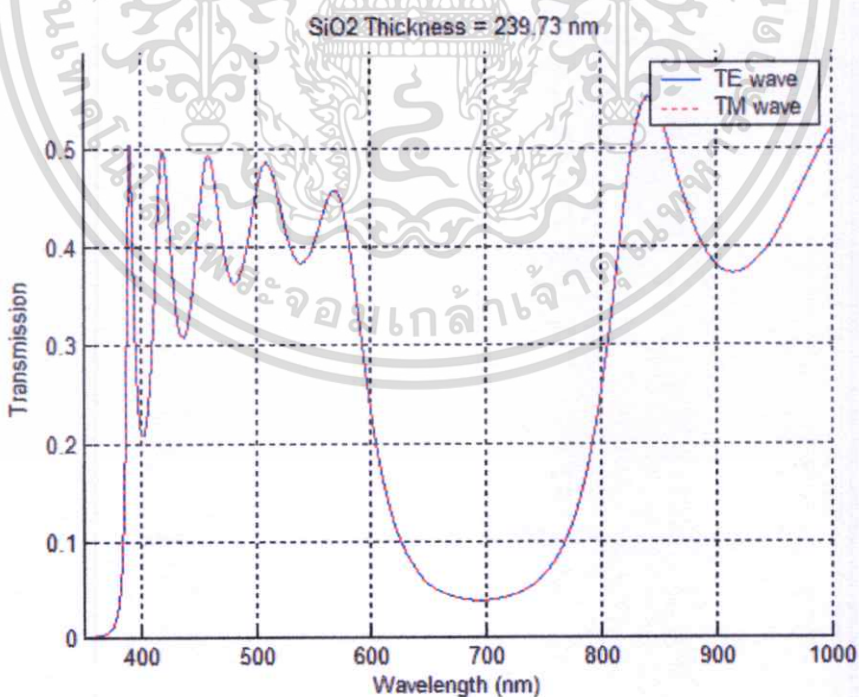


รูปที่ 4.9 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทาดิล-ไดอิเล็กทริกที่มี ความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์เท่ากับ 171.23 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่มีความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์เท่ากับ 205.48 นาโนเมตร



รูปที่ 4.11 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่มีความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์เท่ากับ 239.73 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

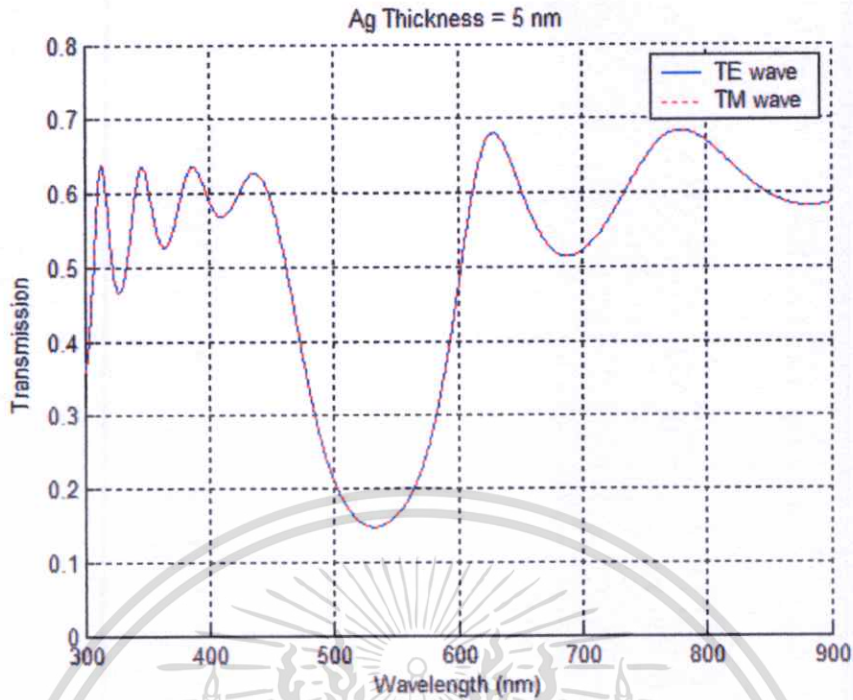
จากการศึกษาในส่วนแรกซึ่งแสดงถึงผลกระทบของการเลือกความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ซึ่งพบว่ามีผลกระทบต่อตำแหน่งศูนย์กลางของแถบช่องว่างทางแสงของโครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกแบบต่างๆ โดยผลการคำนวณจากรูปที่ 4.7 ถึง 4.11 ถูกรวบรวมและแสดงในตารางที่ 4.2 จากผลการคำนวณในตารางจึงสามารถสรุปได้ว่าการออกแบบโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงนั้นสามารถกำหนดตำแหน่งศูนย์กลางของแถบช่องว่างทางแสงหรือย่านความยาวคลื่นที่ถูกโครงสร้างชนิดนี้สะท้อนออกไปได้ด้วยการกำหนดความหนาของชั้นไดอิเล็กทริก

ตารางที่ 4.2 แสดงผลค่าตำแหน่งศูนย์กลางของแถบช่องว่างทางแสงสำหรับค่าความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ต่างๆ

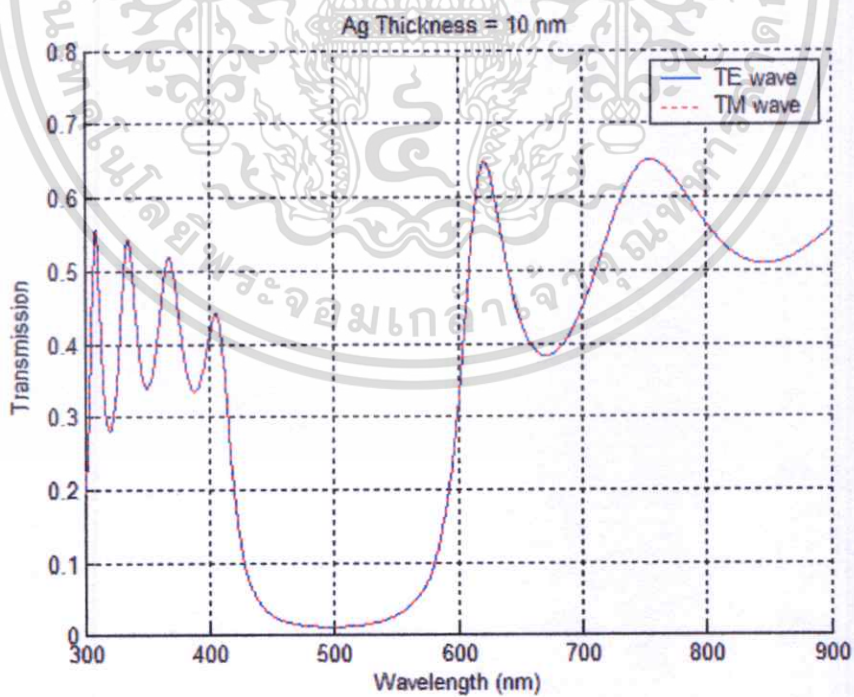
ความหนาชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (นาโนเมตร)	ความยาวคลื่นศูนย์กลาง λ_0 (นาโนเมตร)
102.74	300
136.99	400
171.23	500
205.48	600
239.73	700

4.2.2 สมบัติการส่งผ่านเมื่อความหนาของเงินมีค่าต่างๆ

ในการคำนวณส่วนต่อมาทำการศึกษาผลกระทบของค่าการส่งผ่านเมื่อความหนาของชั้นเงิน (A_g) มีค่าต่างๆ ได้แก่ 5, 10, 15, 20 และ 25 นาโนเมตรตามลำดับซึ่งเป็นความหนาที่มีค่าน้อยกว่าและมากกว่าสกินเดปท์ของเงิน สำหรับเงื่อนไขอื่นๆ ได้แก่ความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 171.23 นาโนเมตร จำนวนคาบของโครงสร้างเท่ากับ 5 คาบ มุมตกกระทบของแสงมีค่าเป็น 0 องศา และเลือกใช้อากาศเป็นฐานรองของโครงสร้างซึ่งผลการคำนวณสเปกตรัมการส่งผ่านถูกแสดงดังรูปที่ 4.12 ถึง 4.16

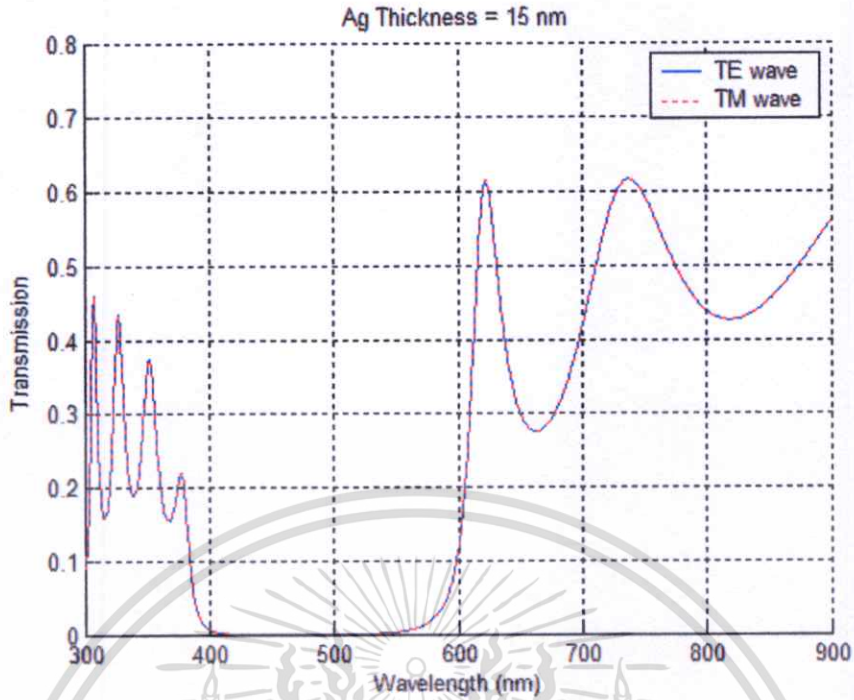


รูปที่ 4.12 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่มีความหนาของชั้นเงินเท่ากับ 5 นาโนเมตร

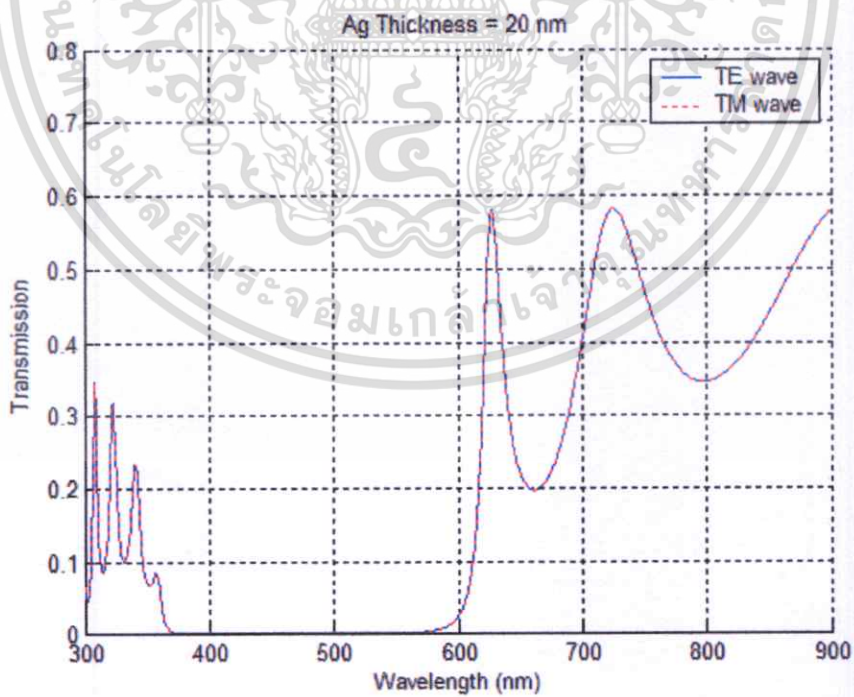


รูปที่ 4.13 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่มีความหนาของชั้นเงินเท่ากับ 10 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

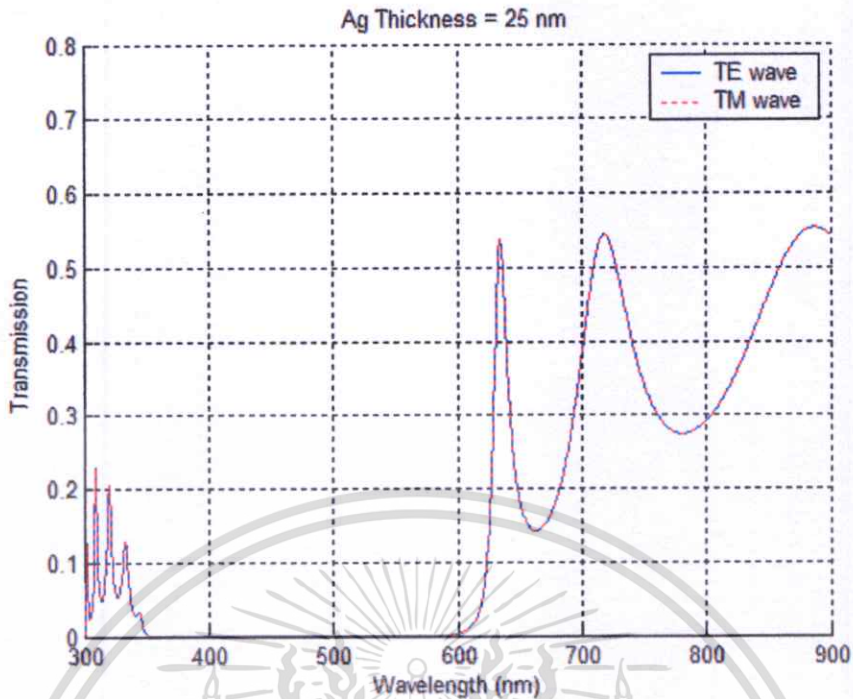


รูปที่ 4.14 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่มีความหนาของชั้นเงินเท่ากับ 15 นาโนเมตร



รูปที่ 4.15 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่มีความหนาของชั้นเงินเท่ากับ 20 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้กับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

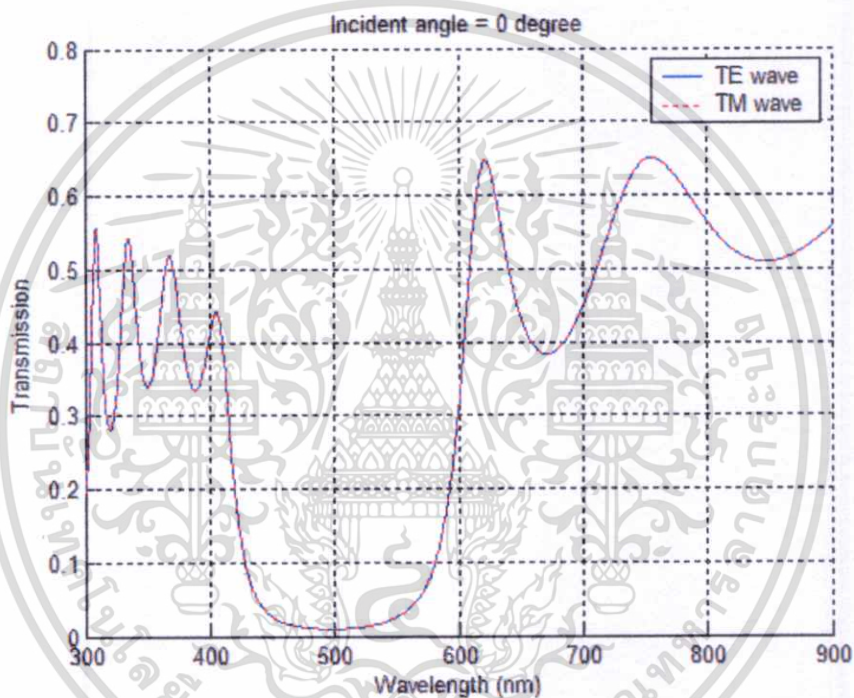


รูปที่ 4.16 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่มีความหนาของชั้นเงินเท่ากับ 25 นาโนเมตร

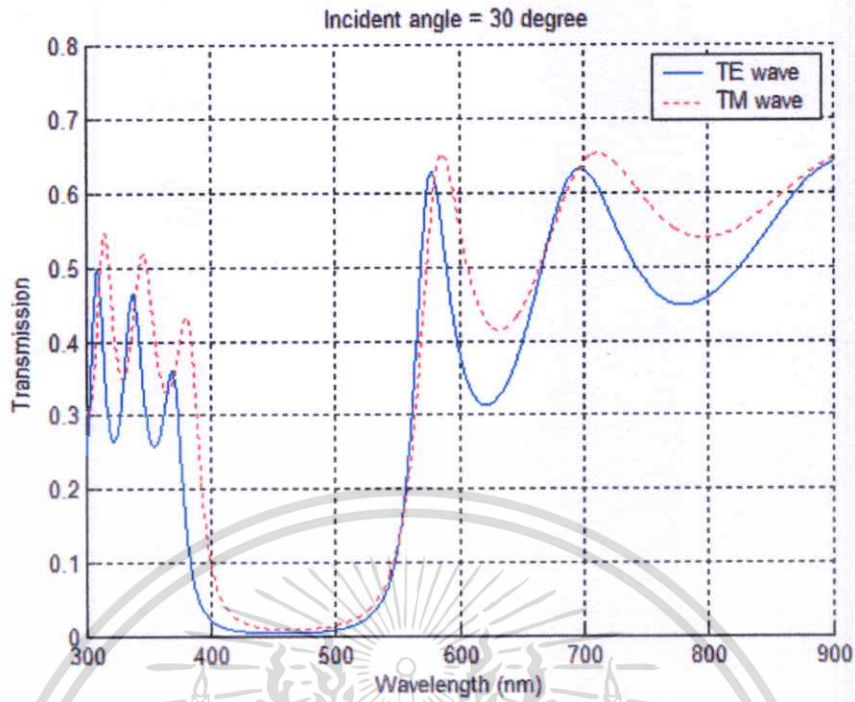
ต่อมาพิจารณาสเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกนี้เมื่อความหนาของชั้น โลหะมีค่าต่างๆ ซึ่งสำหรับ โลหะเงินที่ใช้ในกรณีนี้มีค่าสกินเดปท์อยู่ที่ประมาณ 13 นาโนเมตร จากผลการคำนวณซึ่งแสดงสเปกตรัมการส่งผ่านพบว่าสำหรับชั้นเงินความหนาที่มีค่าน้อยกว่าค่าสกินเดปท์นั่นคือ 5 และ 10 นาโนเมตรนั้นให้ค่าการส่งผ่านที่ดีเนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนใหญ่สามารถแพร่ผ่าน โครงสร้างนี้ได้เกือบทั้งหมด ในขณะที่โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงที่มีความหนาของชั้น โลหะมีค่ามากกว่าสกินเดปท์ได้แก่ 15, 20 และ 25 นาโนเมตรพบว่าค่าการส่งผ่านมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกรณีชั้นเงินความหนาน้อยกว่าสกินเดปท์เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนใหญ่ถูกสะท้อนออกไปและจากเหตุผลตรงนี้ทำให้โครงสร้างที่มีชั้นเงินหนากว่าสกินเดปท์จะมีขนาดของแถบช่องว่างทางแสงกว้างกว่ากรณีโครงสร้างที่มีชั้นเงินหนาน้อยกว่าสกินเดปท์

4.2.3 สมบัติการส่งผ่านเมื่อมุมตกกระทบของแสงมีค่าต่างๆ

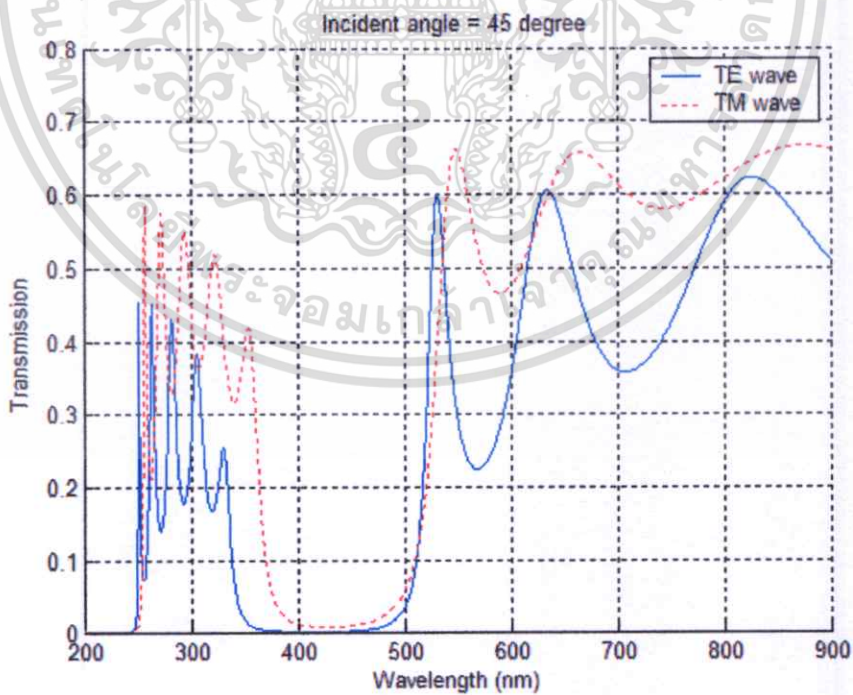
ในการคำนวณส่วนต่อมาทำการศึกษาผลกระทบต่อค่าการส่งผ่านของโครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกเมื่อมุมตกกระทบของแสงเมื่อเทียบกับแกน z หรือเส้นปกติมีค่าเปลี่ยนแปลงไป โดยความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์และเงินมีค่าเท่ากับ 171.23 และ 10 นาโนเมตรตามลำดับ จำนวนคาบของโครงสร้างเท่ากับ 5 คาบ ใช้อากาศเป็นฐานรอง และเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระทบของแสงมีค่าเป็น 0, 30, 45 และ 60 องศาตามลำดับ ซึ่งผลการคำนวณถูกแสดงดังรูปที่ 4.17 ถึง 4.20



รูปที่ 4.17 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก กรณีที่มุมตกกระทบของแสงเท่ากับ 0 องศา

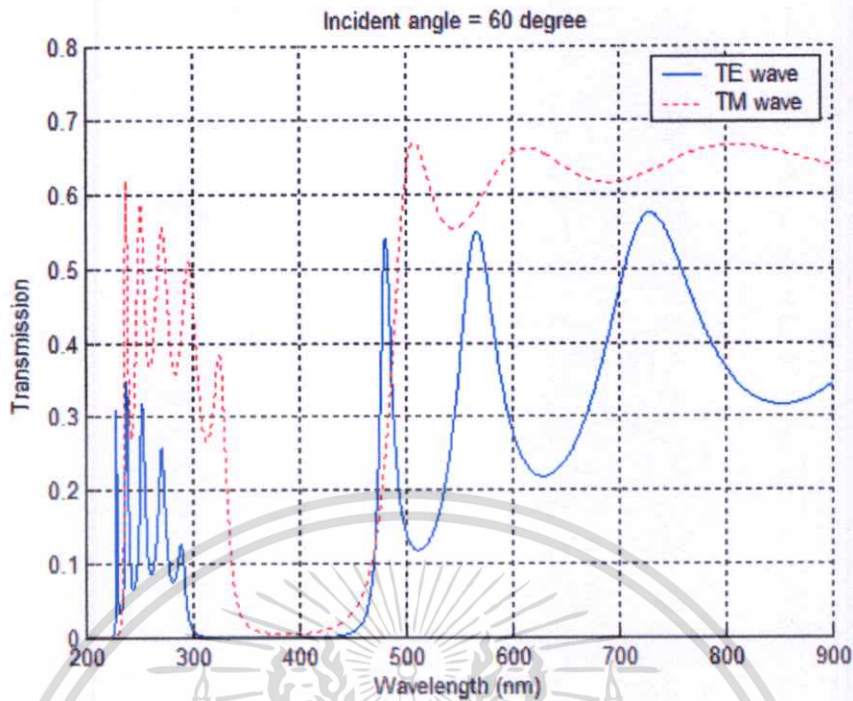


รูปที่ 4.18 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก
กรณีที่มีมุมตกกระทบของแสงเท่ากับ 30 องศา



รูปที่ 4.19 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก
กรณีที่มีมุมตกกระทบของแสงเท่ากับ 45 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

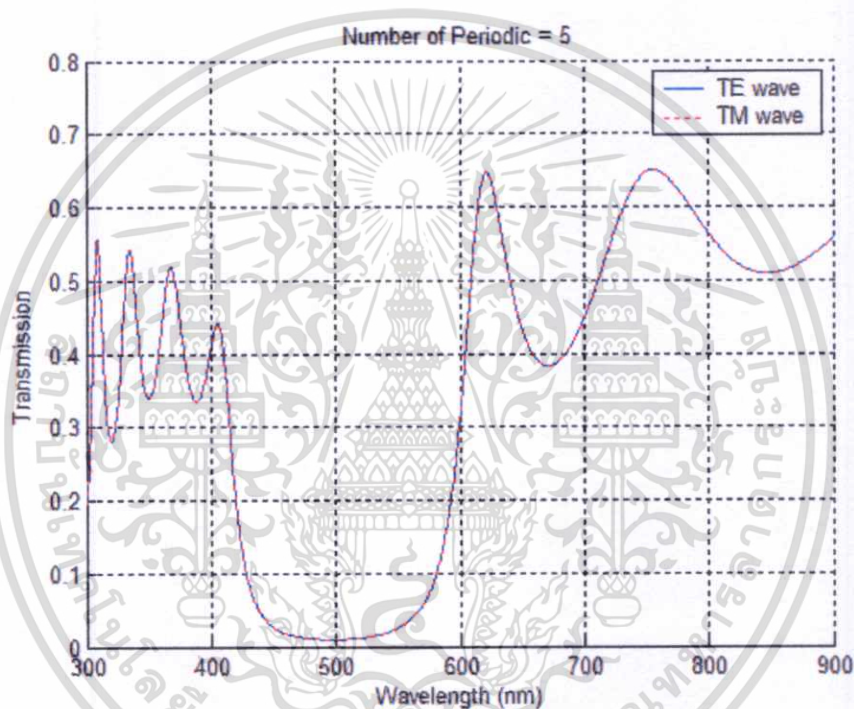


รูปที่ 4.20 สเปกตรัมการส่งผ่านของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก กรณีที่มุมตกกระทบของแสงเท่ากับ 60 องศา

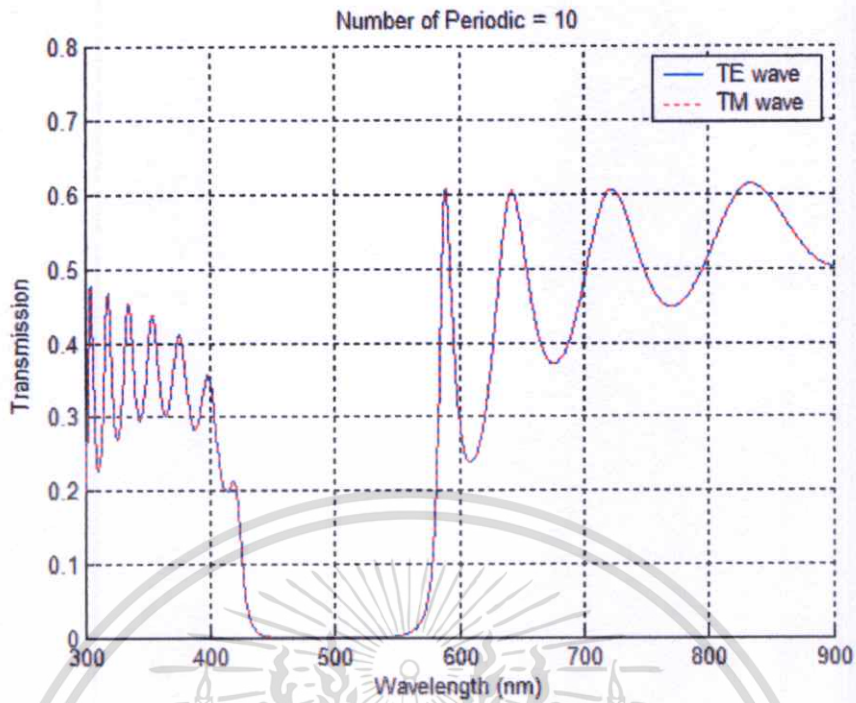
ปัจจัยภายนอกชนิดที่สามซึ่งส่งผลกระทบต่อการแพร่ของแสงภายใน โครงสร้างชนิดนี้ ได้แก่มุมตกกระทบที่มีค่าต่างๆ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง โหมด TE (เส้นสีน้ำเงิน) และโหมด TM (เส้นประสีแดง) จากสเปกตรัมการส่งผ่านของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกในรูปที่ 4.17 ถึง 4.20 พบว่าเมื่อมุมตกกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือแสงมีค่าเพิ่มขึ้น ตำแหน่งของแถบช่องว่างทางแสงจะมีค่าเปลี่ยนไปโดยสังเกตได้จากความยาวคลื่นศูนย์กลางของ แถบช่องว่างทางแสง (λ_0) โดยการเปลี่ยนตำแหน่งจะเลื่อนไปในย่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูง (blue shift) นอกจากนี้ยังสังเกตพบที่มุมตกกระทบที่ 0 องศาสเปกตรัมการส่งผ่านของ คลื่นโพลาไรซ์แบบ s (โหมด TE) และแบบ p (โหมด TM) อยู่ในตำแหน่งเดียวกันจนเส้นสเปกตรัม ทับกันสนิทพอดี แต่เมื่อมุมตกกระทบเปลี่ยนไปสเปกตรัมของคลื่นทั้งสองชนิดจะเกิดการแบ่งแยก ให้เห็นอย่างชัดเจน ซึ่งผู้วิจัยคาดว่าเกิดจากรูปแบบการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของคลื่นแสงมีการเปลี่ยนแปลงไป เมื่อมุมตกกระทบของแสงมีค่าต่างๆ ทั้งสำหรับคลื่นแสงโพลาไรซ์แบบ s และ แบบ p และค่าการส่งผ่านมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อมุมตกกระทบของแสงเท่ากับ 90 องศาเนื่องจากทิศทาง การแพร่ของสนามไฟฟ้าจะขนานกับผิวระนาบของ โครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกและไม่เกิดการแพร่เข้าไปภายใน โครงสร้าง

4.2.4 สมบัติการส่งผ่านเมื่อจำนวนคาบของโครงสร้างมีค่าต่างๆ

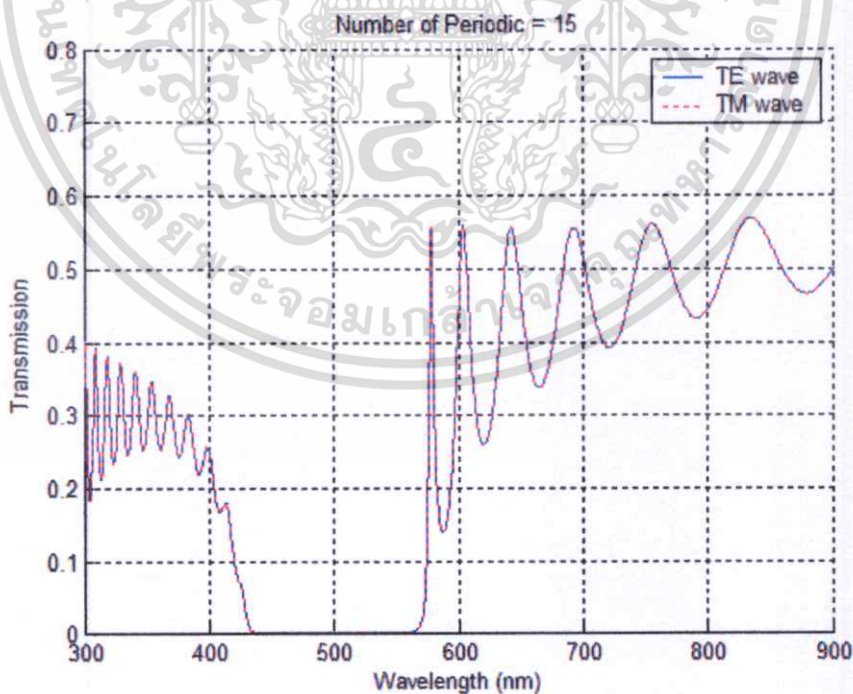
ในการศึกษาหัวข้อนี้เป็นการศึกษาถึงผลกระทบต่อค่าการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกซึ่งในแต่ละโครงสร้างมีจำนวนคาบของโครงสร้างแตกต่างกันเป็น 5, 10, 15 และ 20 คาบตามลำดับ โดยความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์และเงินมีค่าเท่ากับ 171.23 และ 10 นาโนเมตรตามลำดับ มุมตกกระทบของแสงมีค่าเท่ากับ 0 องศา และเลือกใช้อากาศเป็นฐานรองของโครงสร้างซึ่งผลการคำนวณสเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกแสดงดังรูปที่ 4.21 ถึง 4.24



รูปที่ 4.21 สเปกตรัมการส่งผ่านของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก กรณีที่โครงสร้างแบบเป็นคาบนี้มีจำนวนคาบเท่ากับ 5

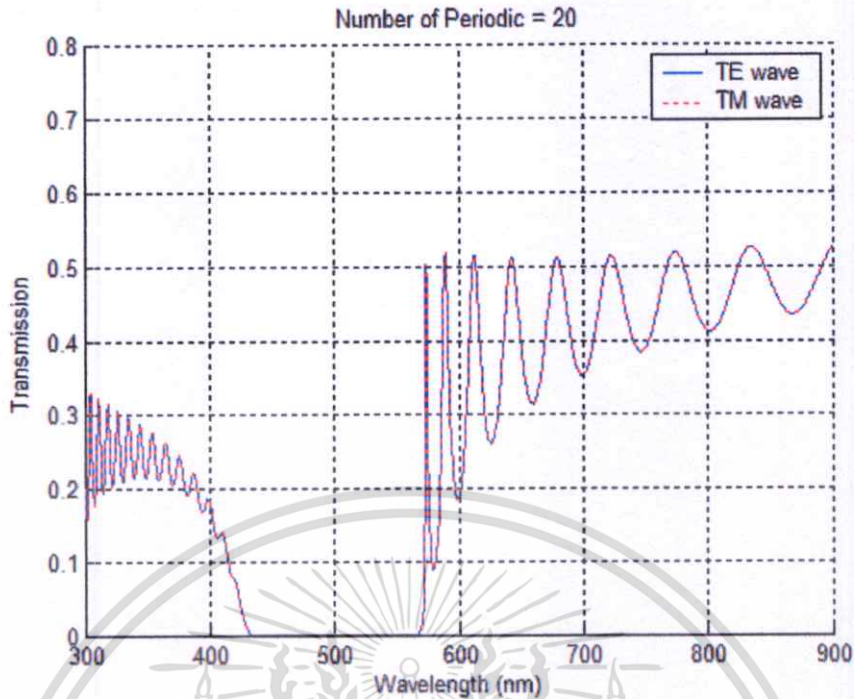


รูปที่ 4.22 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก
กรณีนี้โครงสร้างแบบเป็นคาบนี้มีจำนวนคาบเท่ากับ 10



รูปที่ 4.23 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก
กรณีนี้โครงสร้างแบบเป็นคาบนี้มีจำนวนคาบเท่ากับ 15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรรเชิงในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



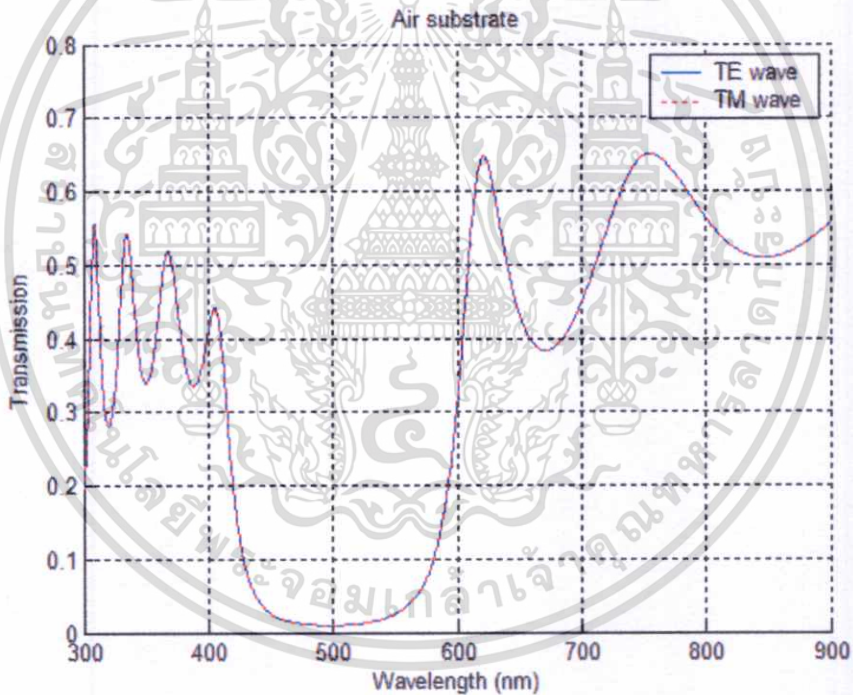
รูปที่ 4.24 สเปกตรัมการส่งผ่านของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก กรณีที่โครงสร้างแบบเป็นคาบนี้มีจำนวนคาบเท่ากับ 20

ปัจจัยภายนอกชนิดที่สี่ซึ่งส่งผลกระทบต่อการแพร่ของแสงภายใน โครงสร้างชนิดนี้ได้แก่จำนวนคาบของ โครงสร้าง เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกเป็น โครงสร้างที่เกิดจากการจัดเรียงตัวอย่างเป็นคาบของชั้น ไดอิเล็กทริกและ โลหะ ซึ่งเมื่อทำการคำนวณหาสเปกตรัมการส่งผ่านของ โครงสร้างชนิดนี้ที่มีจำนวนคาบแตกต่างกันเป็น 5, 10, 15 และ 20 คาบตามลำดับดังแสดง ในรูปที่ 4.21 ถึงรูปที่ 4.24 พบว่าเมื่อจำนวนคาบของ โครงสร้างมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นค่าการส่งผ่านกลับมีค่าลดลงเนื่องจากจำนวนของชั้นสาร ไดอิเล็กทริกและ โลหะ ที่มากขึ้นจึงเกิดการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ภายใน โครงสร้างมากขึ้นนั่นเอง นอกจากนี้แล้วยังสังเกตพบว่าจำนวนคาบของ โครงสร้างที่เพิ่มขึ้นช่วยให้ลักษณะแถบช่องว่างทางแสงที่ได้ คล้ายกับแถบช่องว่างทางแสงในอุดมคติที่ขอบของแถบช่องว่างทางแสงตั้งฉากกับแกนนอนของ กราฟ ซึ่งแถบช่องว่างทางแสงในอุดมคตินี้จะสามารถบดบังความยาวคลื่นที่ไม่สามารถส่งผ่าน โครงสร้างได้อย่างแน่นอน จากรูปที่ 4.21 ซึ่งแสดงสเปกตรัมการส่งผ่านของ โครงสร้างที่มีจำนวน คาบน้อยที่สุดคือ 5 คาบกับรูปที่ 4.24 ซึ่งแสดงสเปกตรัมการส่งผ่านของ โครงสร้างที่มีจำนวนคาบ มากที่สุดคือ 20 คาบ พบว่าความชันของขอบแถบช่องว่างทางแสงในรูปที่ 4.24 มีค่าเข้าใกล้ 90 องศามากกว่าในรูปที่ 4.21 จึงสามารถแสดงช่วงความยาวคลื่นที่ไม่สามารถส่งผ่าน โครงสร้างได้ ชัดเจนกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

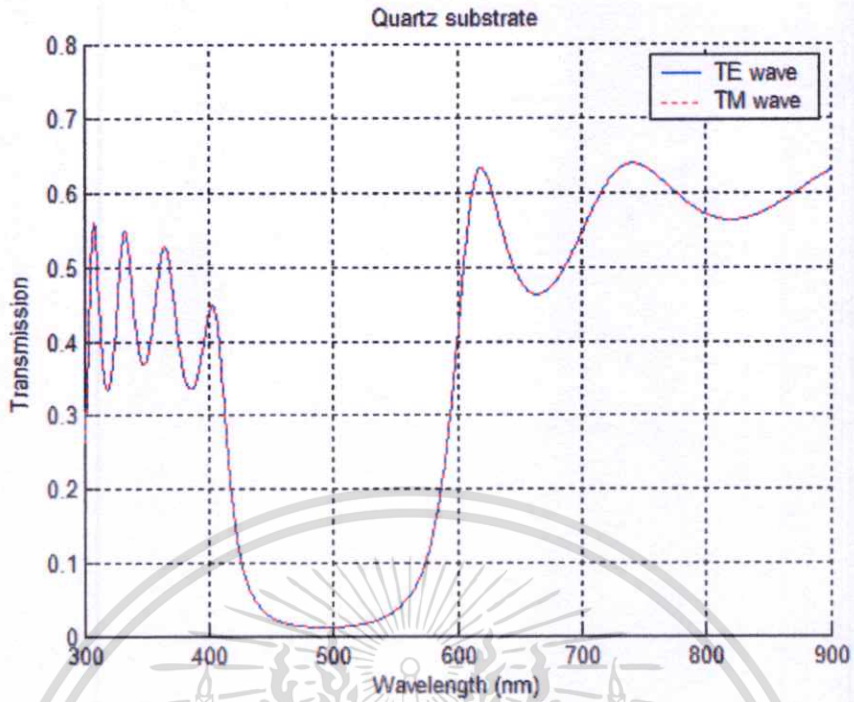
4.2.5 สมบัติการส่งผ่านเมื่อชนิดวัสดุของฐานรองโครงสร้างต่างกัน

สำหรับส่วนสุดท้ายของการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบ เมทัลโล-ไดอิเล็กทริกได้แก่การศึกษาผลกระทบของค่าการส่งผ่านสำหรับฐานรองของโครงสร้างที่ เลือกใช้วัสดุที่แตกต่างกัน โดยวัสดุที่เลือกใช้สำหรับศึกษาเหตุการณ์นี้ได้แก่ อากาศ, ควอตซ์, อะลูมินา, และซิลิกอน โดยวัสดุที่ถูกนำมาใช้เป็นฐานรอง โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงนี้มีค่าดัชนีหักเหแสดงดังตารางที่ 4.3 และค่าครรชนีหักเหดังกล่าวถูกนำไปแทนค่าลงใน โปรแกรม คอมพิวเตอร์ สำหรับพารามิเตอร์อื่นๆ ได้แก่ความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์และเงินมีค่า เท่ากับ 171.23 และ 10 นาโนเมตรตามลำดับ มุมตกกระทบของแสงเท่ากับ 0 องศา และจำนวนคาบ ของโครงสร้างเท่ากับ 5 ผลการคำนวณสเปกตรัมการส่งผ่านของ โครงสร้าง ในกรณีนี้ถูกแสดงดังรูป ที่ 4.25 ถึง 4.28

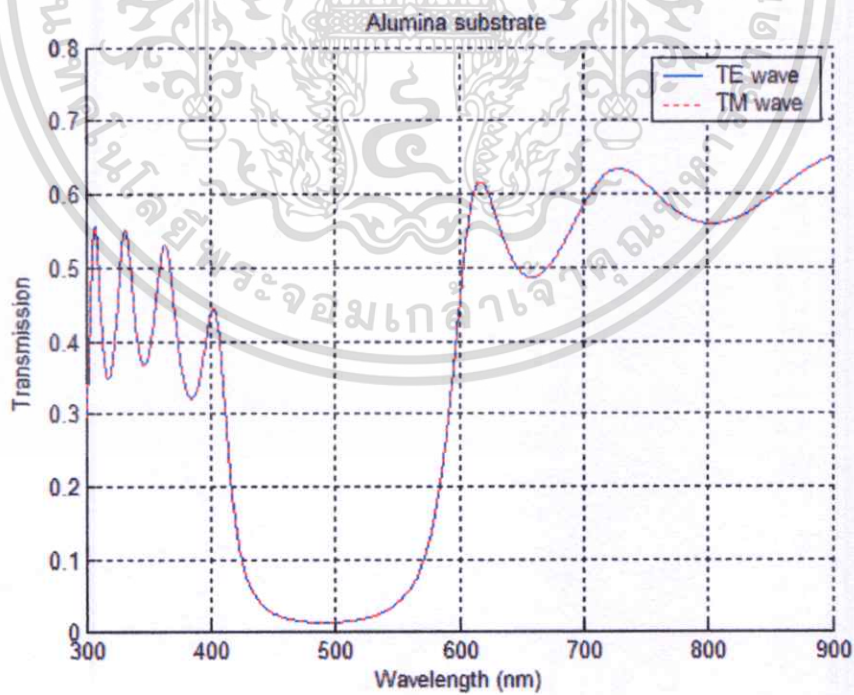


รูปที่ 4.25 สเปกตรัมการส่งผ่านของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่มี ฐานรองเป็นอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

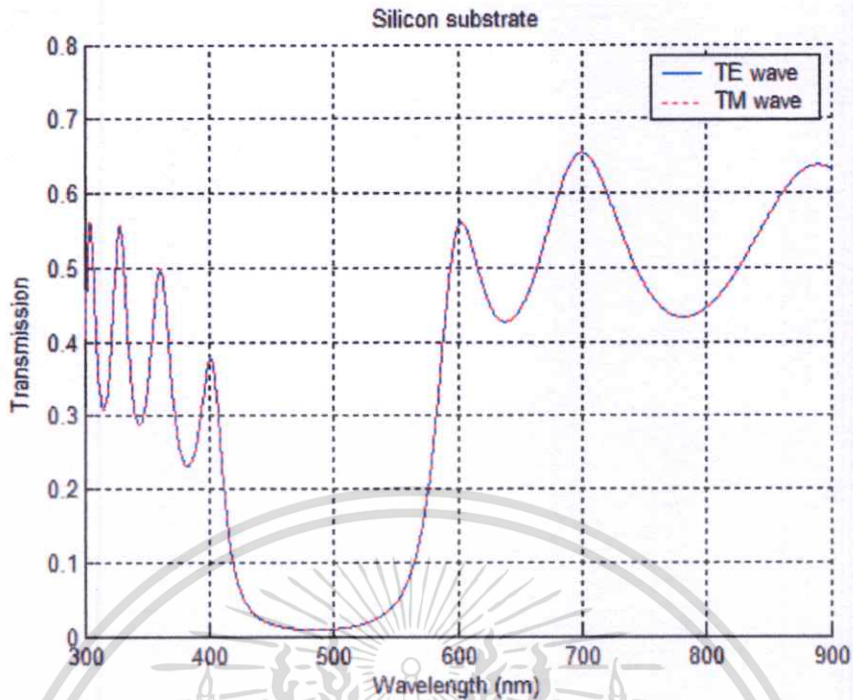


รูปที่ 4.26 สเปกตรัมการส่งผ่านของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่มีฐานรองเป็นควอตซ์



รูปที่ 4.27 สเปกตรัมการส่งผ่านของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่มีฐานรองเป็นอะลูมินา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านของ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทล โล-ไดอิเล็กทริกที่มีฐานรองเป็นซิลิกอน

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าดัชนีหักเหของวัสดุชนิดต่างๆที่ถูกเลือกมาใช้เป็นฐานรอง

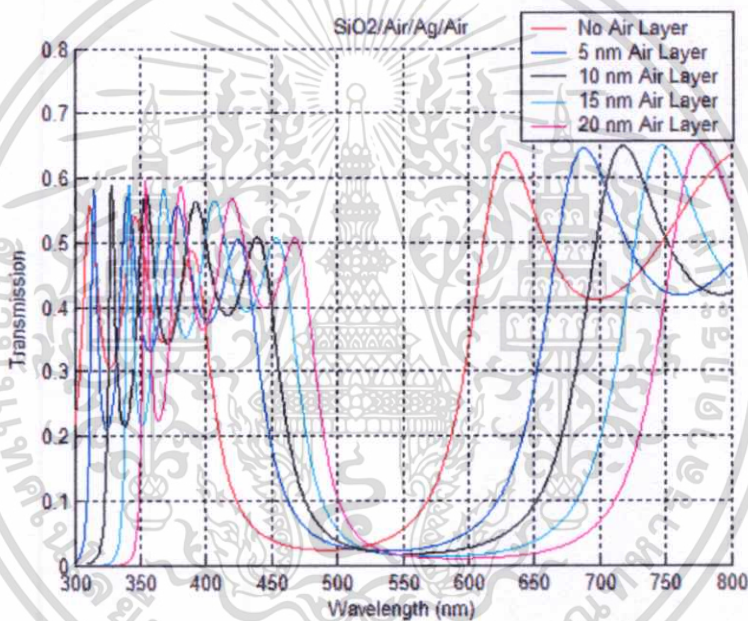
ชนิดของวัสดุ	ค่าดัชนีหักเห (n_s)
อากาศ	1.0
ควอตซ์	1.5
อะลูมินา	1.8
ซิลิกอน	3.5

ปัจจัยภายนอกชนิดสุดท้ายซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานของแสงภายใน โครงสร้างนี้ได้แก่ ชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นฐานรองของ โครงสร้างจากผลการคำนวณหาสเปกตรัมการส่งผ่านดังแสดง ในรูปที่ 4.25 ถึง 4.28 พบว่าชนิดของฐานรองส่งผลให้ค่าการส่งผ่านส่งผ่านมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากวัสดุที่ใช้เป็นฐานรองนั้นมีค่าดัชนีหักเหประจำตัวอยู่ ดังนั้นหากเลือกใช้วัสดุที่มีค่า ดัชนีหักเหสูงมากส่งผลให้การแพร่ผ่าน โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงนี้มีค่าลดลงไป แต่ อย่งไรก็ตามผลกระทบจากปัจจัยนี้ถือว่ามมีผลกระทบน้อยมากเมื่อเทียบกับปัจจัยภายนอกอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 สมบัติการส่งผ่านเมื่อคำนึงถึงชั้นอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อโลหะ-ไดอิเล็กทริก

เนื่องจากโครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่สร้างขึ้นจริงในทางปฏิบัติอาจมีชั้นอากาศแทรกอยู่ระหว่างชั้นไดอิเล็กทริกและโลหะ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงศึกษาสมบัติการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่มีชั้นอากาศแทรกอยู่ระหว่างชั้นไดอิเล็กทริกและเงิน โดยใช้ระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอนในการคำนวณ แต่โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ต้องได้รับการปรับปรุงจากโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณในหัวข้อที่ผ่านมาเนื่องจากเมทริกซ์ถ่ายโอนของกรณีนี้มีค่าแตกต่างจากกรณีโครงสร้างที่ไม่มีชั้นอากาศแทรกอยู่ โดยในการคำนวณกำหนดให้ความหนาของซิลิกอนไดออกไซด์และเงินมีค่าเป็น 171.23 และ 10 นาโนเมตรและความหนาของชั้นอากาศที่แทรกอยู่มีค่า 5, 10, 15 และ 20 นาโนเมตรตามลำดับและผลการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 สเปกตรัมการส่งผ่านในกรณีที่คำนึงถึงชั้นอากาศที่แทรกอยู่ระหว่างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์กับเงินที่มีความหนาเป็น 0, 5, 10, 15 และ 20 นาโนเมตรตามลำดับ

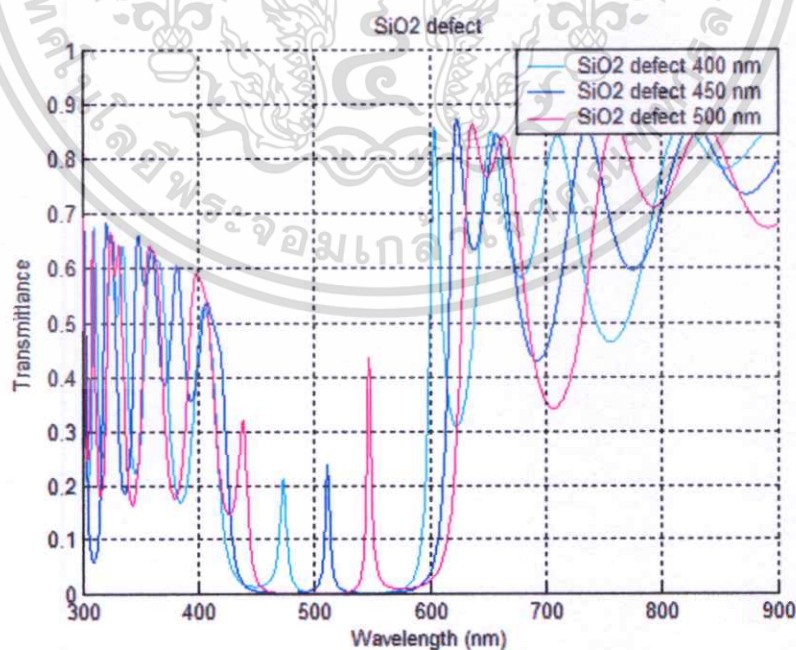
จากผลการคำนวณในรูปที่ 4.29 พบว่าเมื่อคำนึงถึงการมีชั้นอากาศแทรกอยู่ระหว่างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์และเงิน ส่งผลให้สเปกตรัมการส่งผ่านโดยเฉพาะแถบช่องว่างทางแสงของมีตำแหน่งเลื่อนไป โดยเมื่อความหนาของชั้นอากาศที่แทรกอยู่หนามากขึ้นตำแหน่งของแถบช่องว่างทางแสงจะเลื่อนไปในบริเวณที่มีความยาวคลื่นมากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีชั้นอากาศแทรกอยู่ (เส้นสีแดง) รวมทั้งแถบช่องว่างทางแสงมีความกว้างมากขึ้น ซึ่งสาเหตุของเหตุการณ์นี้คาดว่าเกิดจากเมื่อมีชั้นอากาศแทรกอยู่ระหว่างชั้นไดอิเล็กทริกและโลหะ ทำให้ลักษณะการสะท้อนและส่งผ่านของคลื่นแสงภายในโครงสร้างนี้แตกต่างจากในกรณีโครงสร้างที่ไม่มีชั้นอากาศแทรกอยู่เลย

4.4 สมบัติการส่งผ่านของสถานะบัพพร้อมของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง

ผลการคำนวณในหัวข้อต่อมาคือการคำนวณสมบัติการส่งผ่านของสถานะบัพพร้อมของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกซึ่งมีลักษณะโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งการศึกษาในหัวข้อนี้ทำการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของโครงสร้างชนิดนี้ให้มีค่าต่างๆ เช่น ความหนาของชั้นบัพพร้อมที่ถูกเพิ่มเข้ามาในโครงสร้าง, ชนิดของชั้นบัพพร้อมที่ถูกเพิ่มเข้ามาในโครงสร้าง, และจำนวนคาบของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์-เงินภายในโครงสร้าง เพื่อสังเกตสมบัติการส่งผ่านของโครงสร้างในเงื่อนไขต่างๆ

4.4.1 สมบัติการส่งผ่านของสถานะบัพพร้อมของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงที่ชั้นบัพพร้อมมีความหนาแตกต่างกัน

ในส่วนแรกเป็นการศึกษาสมบัติการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์และเงินที่มีความหนาเป็น 171.23 และ 10 นาโนเมตรตามลำดับจำนวน 5 คาบ และชั้นบัพพร้อมที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงในลักษณะเดียวกันกับรูปที่ 3.4 คือชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ซึ่งมีความหนา (d_D) แตกต่างจากชั้นซิลิกอนไดออกไซด์อื่นๆ โดยมีความหนาเป็น 400, 450 และ 500 นาโนเมตรตามลำดับ โดยผลการคำนวณสเปกตรัมการส่งผ่านถูกแสดงดังรูปที่ 4.30



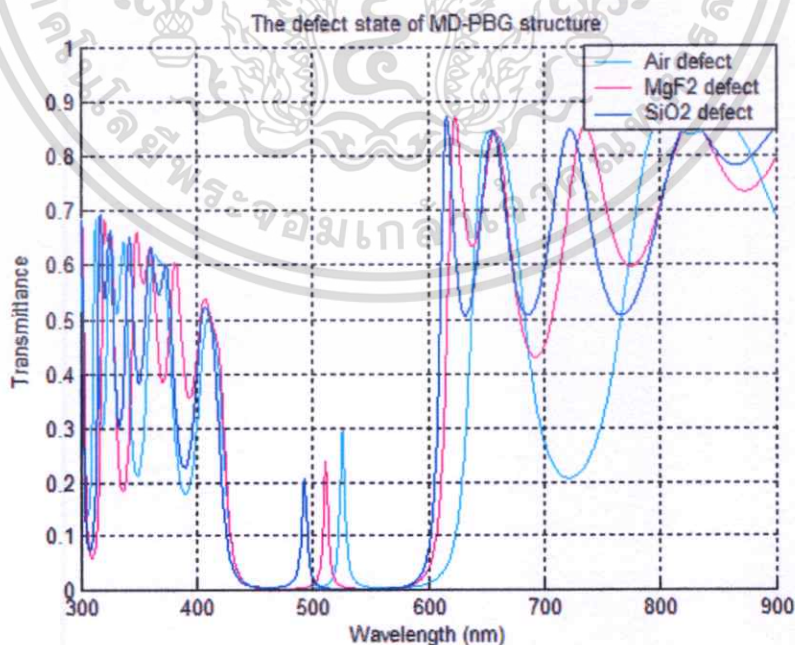
รูปที่ 4.30 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างที่ชั้นบัพพร้อมมีความหนาต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการคำนวณในรูปที่ 4.30 แสดงให้เห็นว่าข้อบกพร่องที่เป็นชั้นไดอิเล็กทริกชนิดเดียวกันกับในโครงสร้างแบบเป็นคาบเพียงแต่มีความหนาแตกต่างกันทำให้เกิดสถานะบกพร่องของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกได้โดยสังเกตได้จากการเกิดค่าการส่งผ่านสูงสุดภายในแถบช่องว่างทางแสงหรือที่เรียกว่า “โหมดข้อบกพร่อง” (Defect modes) ซึ่งตำแหน่งของโหมดข้อบกพร่องนี้ขึ้นอยู่กับความหนาของข้อบกพร่อง ยิ่งความหนาเพิ่มขึ้นตำแหน่งของโหมดข้อบกพร่องจะเลื่อนไปในบริเวณที่มีความยาวคลื่นมากขึ้น เนื่องจากโหมดข้อบกพร่องเกิดจากการที่โหมดของคลื่นแสงมีความถี่ตรงกับความถี่กำหนดของข้อบกพร่องที่ทำหน้าที่เสมือนโพรงกำหนด เมื่อความหนาของโพรงกำหนดกว้างมากขึ้นความถี่กำหนดของโพรงจึงลดลง ดังนั้นโหมดของคลื่นแสงที่ทำให้เกิดโหมดข้อบกพร่องจึงอยู่ในบริเวณที่มีความยาวคลื่นมากกว่าเดิม

4.4.2 สมบัติการส่งผ่านของสถานะบกพร่องของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงที่มีชนิดของข้อบกพร่องต่างกัน

ในส่วนต่อมาเป็นการศึกษาสมบัติการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวของชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์และเงินที่มีความหนาเป็น 171.23 และ 10 นาโนเมตรตามลำดับจำนวน 5 คาบ และข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงในลักษณะเดียวกันกับรูปที่ 3.4 คือชั้นอากาศ, แมกนีเซียมฟลูออไรด์ และซิลิกอน ไดออกไซด์ซึ่งมีความหนา (d_p) เป็น 450 นาโนเมตร โดยผลการคำนวณสเปกตรัมการส่งผ่านถูกแสดงดังรูปที่ 4.31



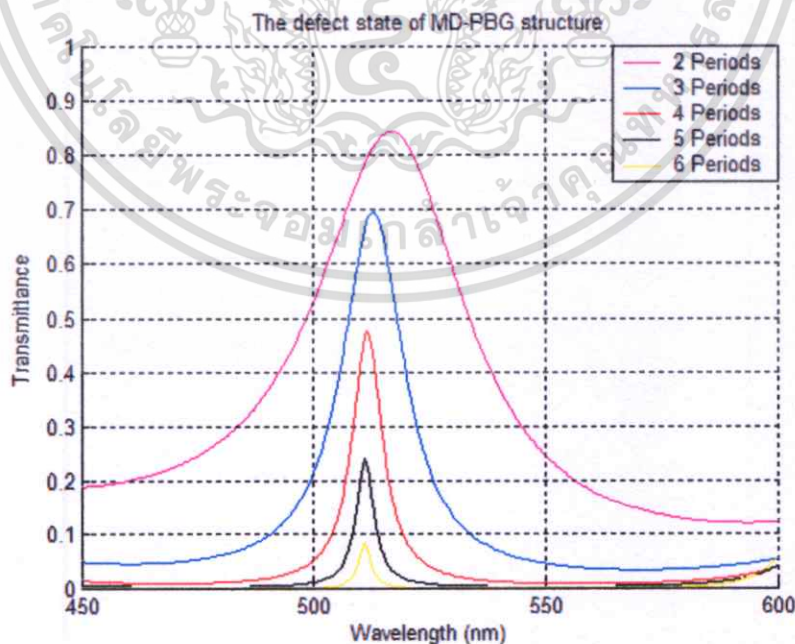
รูปที่ 4.31 สเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างที่มีข้อบกพร่องต่างชนิดกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการคำนวณในรูปที่ 4.31 สำหรับสถานะบกพร่องของโครงสร้างแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่มีข้อบกพร่องเป็นอากาศ ($n_{\text{Air}} = 1.00$), แมกนีเซียมไดฟลูออไรด์ ($n_{\text{MgF}_2} = 1.37$) และซิลิกอนไดออกไซด์ ($n_{\text{SiO}_2} = 1.46$) ซึ่งมีความหนาเท่ากัน พบว่าเมื่อค่าครรชนหักเหของข้อบกพร่องมากขึ้น ตำแหน่งของโหมดข้อบกพร่องจะเลื่อนไปในบริเวณที่มีความยาวคลื่นสั้นลงหรือความถี่สูงขึ้น เนื่องจากครรชนหักเหของข้อบกพร่องที่เสมือนเป็น โฟงก้าทอนมีค่ามากขึ้นความถี่ก้าทอนของโพรงจึงมีค่าสูงขึ้น ดังนั้น โหมดของคลื่นแสงที่สามารถเกิดเป็นโหมดข้อบกพร่องได้จึงต้องเป็นโหมดที่มีความถี่สูงขึ้นจากเดิม

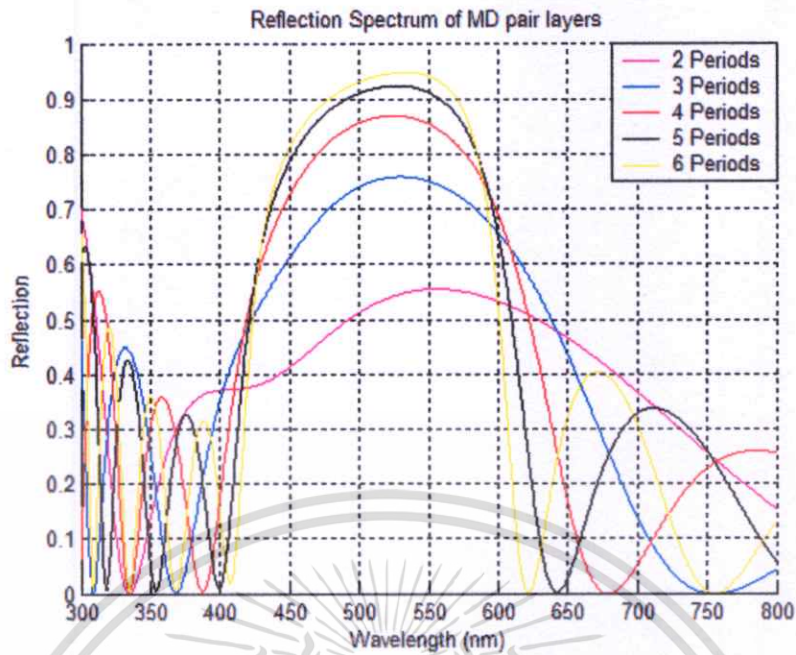
4.4.3 สมบัติการส่งผ่านของสถานะบกพร่องของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงที่มีจำนวนคาบของโครงสร้างแตกต่างกัน

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาสถานะบกพร่องของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกซึ่งเกิดจากการจัดเรียงของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์และเงินซึ่งมีความหนาเท่ากับ 171.23 และ 10 นาโนเมตรตามลำดับ โดยข้อบกพร่องที่ถูกเพิ่มเข้ามาในโครงสร้างเป็นชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ซึ่งมีความหนา 450 นาโนเมตร โดยเงื่อนไขที่ทำการศึกษาคือสังเกตการเปลี่ยนแปลงของโหมดข้อบกพร่องเมื่อจำนวนคาบของโครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกแบบเป็นคาบทางด้านซ้ายและขวาของข้อบกพร่องมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเป็น 2, 3, 4, 5 และ 6 คาบตามลำดับ โดยผลการคำนวณถูกแสดงดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านของโหมดข้อบกพร่องของโครงสร้างที่มีจำนวนคาบต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 สเปกตรัมการสะท้อนของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่มีจำนวนคาบต่างกัน

จากผลการคำนวณในรูปที่ 4.32 พบว่าเมื่อจำนวนคาบของ โครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกแบบเป็นคาบซึ่งประกบข้อบกพร่องอยู่นั้นมีจำนวนคาบที่แตกต่างไป สเปกตรัมการส่งผ่านของโหมดข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในแถบช่องว่างทางแสงมีลักษณะแตกต่างกัน โดยเมื่อจำนวนคาบของโครงสร้างเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้แบนด์วิธสเปกตรัมการสะท้อนของแถบช่องว่างทางแสงของโครงสร้างแบบเป็นคาบที่ประกบข้อบกพร่องอยู่แคบลงแต่ให้ค่าการสะท้อนสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.33 และส่งผลให้โหมดข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นมีแบนด์วิธแคบลงตามซึ่งถือว่าการปรับปรุงคุณสมบัติความเป็นอาพันธ์ (Coherence) ของโหมดข้อบกพร่องให้ดียิ่งขึ้น

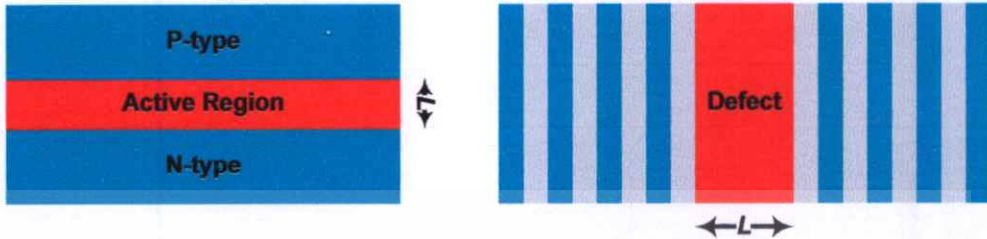
4.5 การประยุกต์ใช้สถานะบัพพร่องของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกเป็นโครงสร้างเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ

จากผลการคำนวณหาสเปกตรัมการส่งผ่านของสถานะบัพพร่องของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก ซึ่งพบว่าภายในแถบเกิดค่าการส่งผ่านขึ้นหรือที่เรียกว่า โหมดข้อบกพร่องที่เกิดจากปรากฏการณ์ Photon localization ภายในข้อบกพร่องของโครงสร้าง และเมื่อสังเกตที่แบนด์วิธของโหมดข้อบกพร่องก็พบว่ามีลักษณะแคบหรือมีความเป็นอาพันธ์สูง ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญของเลเซอร์ ดังนั้นจากการคำนวณดังกล่าวจึงมีเป็นไปได้ที่จะนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างชนิดนี้ไปประยุกต์ใช้เป็นส่วนประกอบของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ รูปที่ 4.34 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างเลเซอร์สารกึ่งตัวนำแบบฟาบรี-เพโรต์กับสถานะบัพพร้อมของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก



รูปที่ 4.34 แสดงลักษณะโครงสร้างเลเซอร์สารกึ่งตัวนำแบบฟาบรี-เพโรต์ (ซ้าย) และสถานะบัพพร้อมของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก (ขวา)

จากหลักการทำงานของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำแบบฟาบรี-เพโรต์ (Fabry-Perot) ซึ่งได้แก่โฟตอนที่เกิดขึ้นจะถูกสะท้อนไปมาภายในบริเวณทำงาน (Active region) หรือทำหน้าที่เป็นโพรงก้ำทอน โดยชั้นสารกึ่งตัวนำชนิด P และชนิด N ทำหน้าที่เป็นกระจกสะท้อนและทำให้เกิดเลเซอร์ภายในโพรงก้ำทอนขึ้น เมื่อนำสถานะบัพพร้อมของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกมาเปรียบเทียบพบว่าข้อบกพร่องในโครงสร้างเปรียบเทียบกับบริเวณทำงานของเลเซอร์ฟาบรี-เพโรต์เนื่องจากทำหน้าที่เป็นโพรงก้ำทอนเช่นเดียวกัน และโครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกแบบเป็นคาบที่ประกบข้อบกพร่องอยู่ทำหน้าที่เป็นกระจกสะท้อนซึ่งแตกต่างจากกระจกสะท้อนของเลเซอร์ฟาบรี-เพโรต์เนื่องจากสามารถเลือกย่านการสะท้อนได้จากการปรับความเป็นคาบของโครงสร้างหรือเรียกว่ากระจกสะท้อนแบบแบรค (Bragg reflector)

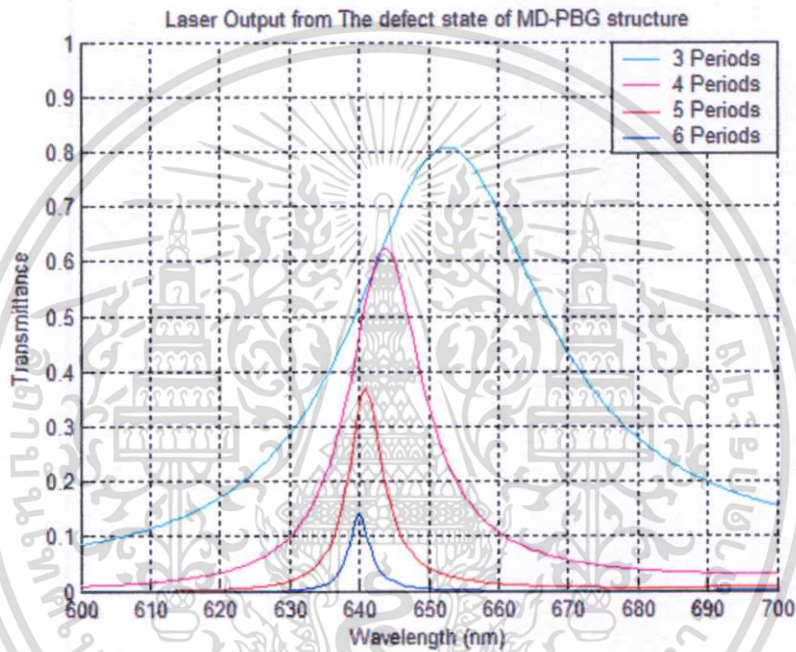
จากลักษณะ โครงสร้างที่คล้ายคลึงกันดังแสดงในรูปที่ 4.34 ดังนั้นการคำนวณหาอัตราขยายเชิงแสงขีดเริ่ม (Gain threshold) ของสถานะบัพพร้อมของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกได้เช่นเดียวกับอัตราขยายเชิงแสงขีดเริ่มของเลเซอร์ฟาบรี-เพโรต์ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (4.1) ได้แก่

$$g_{th} = \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) \quad (4.1)$$

เมื่อ L คือความกว้างของโพรงก้ำทอนหรือความหนาของชั้นบริเวณทำงานของเลเซอร์ฟาบรี-เพโรต์ และ R_1 กับ R_2 คือค่าการสะท้อนของกระจกสะท้อนที่เกิดจากชั้นสารกึ่งตัวนำชนิด P และ N

ตามลำดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบครั้งนี้จะเป็นการนำสถานะบกพร่องของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกโดยเลเซอร์เอาท์พุทหรือโหมดข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นต้องการให้เป็นแสงสีแดงหรือมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 600 - 700 นาโนเมตร ดังนั้นความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์จึงมีค่าเท่ากับ 205.48 นาโนเมตรเพื่อให้ตำแหน่งศูนย์กลางของแถบช่องว่างทางแสงอยู่ในย่านที่ต้องการและเงินมีความหนา 10 นาโนเมตรเช่นที่ผ่านมาและข้อบกพร่องในโครงสร้างเกิดจากชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ความหนา 400 นาโนเมตร ผลการคำนวณสเปกตรัมของเลเซอร์เอาท์พุทเมื่อจำนวนคาบของโครงสร้างมีค่าเป็น 3, 4, 5 และ 6 มีลักษณะแสดงดังรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.35 แสดงเลเซอร์เอาท์พุทจากสถานะบกพร่องของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก

จากผลการคำนวณในรูปที่ 4.35 ให้ลักษณะสเปกตรัมเลเซอร์เอาท์พุทที่แตกต่างกันโดยอยู่ในย่านแสงสีแดงตามที่ต้องการแต่มีแบนด์วิธต่างกันเนื่องจากจำนวนคาบของโครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่ทำหน้าที่เป็นกระจกสะท้อนแบบแบรกก (Bragg) เป็นตัวแปรที่กำหนดค่าการสะท้อนและแบนด์วิธสเปกตรัมการสะท้อนของกระจก เมื่อจำนวนคาบของโครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกมีจำนวนมากค่าการสะท้อนของกระจกจะมีค่าสูงขึ้นในขณะที่แบนด์วิธของสเปกตรัมการสะท้อนแคบลง และส่งผลให้เลเซอร์เอาท์พุทที่ได้มีแบนด์วิธที่แคบลงดังแสดงในตารางที่ 4.4 นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณอัตราขยายเชิงแสงชนิดเริ่มของโครงสร้างที่มีจำนวนคาบต่างกันโดยใช้

สมการ (4.1) และได้ผลการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 4.5 เมื่อ L คือความหนาของข้อบกพร่องซึ่งเท่ากับ 400 นาโนเมตร

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงขนาดแบนด์วิธและค่าการส่งผ่านของเลเซอร์เอทช์พุทของโครงสร้างที่มีจำนวนคาบต่างกัน

จำนวนคาบ (N)	ค่าการสะท้อน (R)	แบนด์วิธ (นาโนเมตร)	ค่าการส่งผ่าน (T)
3	0.8551	35	0.8098
4	0.9265	14	0.6256
5	0.9553	6	0.3686
6	0.9887	4	0.1437

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงอัตราขยายเชิงแสงขีคเริ่มของ โครงสร้างที่มีจำนวนคาบต่างกัน

จำนวนคาบ (N)	ค่าการสะท้อน (R)	อัตราขยายเชิงแสงขีคเริ่ม (g_{th})
3	0.8551	391342.1446
4	0.9265	190853.0831
5	0.9553	114324.6293
6	0.9887	28410.8252

จากผลการคำนวณในตารางที่ 4.4 และ 4.5 พบว่าสถานะบัพพร่องของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่มีจำนวนคาบต่างกันให้เลเซอร์เอทช์พุทที่มีแบนด์วิธต่างกัน โดยโครงสร้างที่มีจำนวนคาบเท่ากับ 6 ให้แบนด์วิธของเลเซอร์เอทช์พุทเท่ากับ 4 นาโนเมตร และมีค่าการส่งผ่านเท่ากับ 0.1437 ในขณะที่โครงสร้างที่มีจำนวนคาบเท่ากับ 3 ให้แบนด์วิธของเลเซอร์เอทช์พุทเท่ากับ 35 นาโนเมตรและมีค่าการส่งผ่านเท่ากับ 0.8098 ซึ่งแตกต่างกัน ต่อมาเมื่อพิจารณาอัตราขยายเชิงแสงขีคเริ่ม (g_{th}) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างเลเซอร์นั้นเกิดสถานะจุดเลเซอร์ (Lasing condition) ได้ง่ายหรือยาก โดยหากว่าค่าอัตราขยายเชิงแสงขีคเริ่มนี้มีค่าน้อยแสดงว่าโครงสร้างนี้สามารถเกิดสถานะจุดเลเซอร์ได้ง่าย ซึ่งจากผลการคำนวณในตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างที่มีจำนวนคาบ 6 มีค่าอัตราขยายเชิงแสงขีคเริ่มเท่ากับ 28410.8252 จึงสามารถทำให้เกิดสถานะจุดเลเซอร์ได้ง่ายกว่าโครงสร้างที่มีจำนวนคาบเท่ากับ 3 และประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้กับโครงสร้างเลเซอร์ชนิดนี้ และจากผลการทดลองดังตารางที่ 4.4 และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 สถานะบัพพรองของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่เหมาะสมต่อการนำมาประยุกต์ใช้เป็น โครงสร้างเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ ได้แก่ โครงสร้างที่มีจำนวนคาบของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์/เงินเท่ากับ 4 เนื่องจากโครงสร้างชนิดนี้ให้แบนด์วิธที่แคบ และมีค่าการส่งผ่านเท่ากับ 0.6256 ซึ่งลักษณะสมบัติของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำในการใช้งานจริงนั้นควรมีค่าการส่งผ่านของเลเซอร์เอาต์พุตอย่างน้อย 50 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น โครงสร้างที่มีจำนวนคาบเป็น 5 และ 6 จึงไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็น โครงสร้างเลเซอร์สารกึ่งตัวนำเพราะให้ค่าการส่งผ่านที่น้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ถึงแม้ว่าจะมีแบนด์วิธของเลเซอร์เอาต์พุตและค่าอัตราการขยายเชิงแสงที่ต่ำก็ตาม และสำหรับ โครงสร้างที่มีจำนวนคาบเท่ากับ 3 นั้นไม่เหมาะต่อการนำมาใช้เป็น โครงสร้างเลเซอร์สารกึ่งตัวนำเนื่องจากแบนด์วิธสเปกตรัมของเลเซอร์เอาต์พุตกว้างเกินไปส่งผลให้เลเซอร์เอาต์พุตไม่เป็นแสงแบบอาพันธ์

ข้อดีของสถานะบัพพรองของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกในการประยุกต์ใช้เป็น ส่วนประกอบของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ ได้แก่ การให้เลเซอร์เอาต์พุตแบบโหมดเดี่ยว (Single mode) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างเลเซอร์สารกึ่งตัวนำแบบ DFB ซึ่งให้เลเซอร์เอาต์พุตแบบโหมดคู่ดังแสดงให้เห็นในสเปกตรัมการส่งผ่านรูปที่ 2.10 ทำให้เลเซอร์เอาต์พุตจากโครงสร้างได้ถูกออกแบบขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ดีกว่าเลเซอร์แบบ DFB โดยสามารถเลือกความยาวคลื่นของเลเซอร์ได้ด้วยการเปลี่ยนความหนาหรือชนิดของชั้นบัพพรอง และปรับแบนด์วิธของสเปกตรัมเลเซอร์เอาต์พุตได้ด้วยการปรับจำนวนคาบของ โครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่อยู่ทางด้านซ้ายและขวาของชั้นบัพพรอง

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

5.1 สรุปผลการคำนวณ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงทฤษฎีสำหรับ โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกซึ่งเป็นโครงสร้างแบบเป็นคาบใน 1 มิติด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน โดย โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงในกรณีนี้สร้างขึ้นจากชั้น ไดอิเล็กทริกซึ่งได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ และชั้น โลหะซึ่งได้แก่ เงิน โดยในส่วนแรกของการวิจัยเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของการ ทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้น โดยเปรียบเทียบผลการคำนวณจาก โปรแกรม LIGHTS กับผลการทดลองจากวิทยานิพนธ์อ้างอิง [21] จากผลการศึกษาเปรียบเทียบพบว่าผลการ คำนวณของโปรแกรมที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นเองให้สเปกตรัมการส่งผ่านที่ใกล้เคียงกับผลของ วิทยานิพนธ์อ้างอิง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงพบว่ามีความแตกต่างซึ่งอาจเกิดขึ้นจาก ความหนาของฟิล์มแต่ละชั้นไม่เท่ากัน และกระบวนการปลูกฟิล์มด้วยเทคนิคอาร์เอฟสปีดเตอร์ริง

ส่วนต่อมาเป็นการศึกษาถึงผลกระทบต่อการส่งผ่านของ โครงสร้างแถบช่องว่างทาง แสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก เริ่มจากการศึกษาผลกระทบเนื่องจากความหนาของชั้น ซิลิกอนไดออกไซด์และเงิน ซึ่งจากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอนพบว่าความหนา ของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์เป็นปัจจัยที่ใช้ในการกำหนดตำแหน่งศูนย์กลางของแถบช่องว่างทาง แสงของโครงสร้างโดยเมื่อความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นตำแหน่งศูนย์กลางแถบ ช่องว่างทางแสงจะเลื่อน ไปในตำแหน่งที่มีความยาวคลื่นมากขึ้น ขณะเดียวกันสำหรับความหนา ของเงินนั้นถูกออกแบบให้มีความน้อยกว่าสกินเดปท์ของเงิน โดยเมื่อความหนามีค่าน้อยกว่าหรือ เท่ากับสกินเดปท์คลื่นแสงส่วนมากสามารถส่งผ่าน ไปได้ ในขณะที่ความหนามีค่ามากกว่าสกิน เดปท์ส่งผลให้ความสามารถในการสะท้อนแสงของโครงสร้างเพิ่มขึ้นและแถบช่องว่างทางแสงจึงมี ขนาคกว้างมากขึ้นนอกจากนี้จากการคำนวณยังพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติการส่งผ่านของ โครงสร้างชนิดนี้ได้แก่ มุมตกกระทบ, จำนวนคาบของ โครงสร้าง และชนิดวัสดุที่ใช้เป็นฐานรอง โดยเมื่อมุมตกกระทบของคลื่นแสงมีค่ามากขึ้นตำแหน่งของแถบช่องว่างทางแสงจะเลื่อน ไปในย่าน ที่มีความยาวคลื่นลดลงทั้งสำหรับคลื่นที่มีการ โพลาไรซ์แบบ s และแบบ p สำหรับจำนวนคาบของ คู่ชั้น ไดอิเล็กทริก-โลหะมีผลกระทบต่อความสมบูรณ์ของแถบช่องว่างทางแสงซึ่งถ้าหาก โครงสร้าง ชนิดนี้มีจำนวนคาบมากเท่าใด แถบช่องว่างทางแสงยังมีความสมบูรณ์มากขึ้นเท่านั้น และสำหรับ ผลกระทบต่อการส่งผ่านเนื่องจากชนิดวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นฐานรองพบว่ามีผลกระทบเล็กน้อย เนื่องจากค่าการส่งผ่านของโครงสร้างที่มีชนิดฐานรองแตกต่างกันมีค่าต่างกันเล็กน้อยเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลกระทบเนื่องจากการเกิดขึ้นอากาศระหว่างรอยต่อของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์และเงินที่มีความหนาแตกต่างกัน พบว่าเมื่อคำนวณสเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่มีชั้นอากาศแทรกอยู่พบว่าตำแหน่งของแถบช่องว่างทางแสงจะเลื่อนไปในบริเวณที่มีความยาวคลื่นมากขึ้นและขนาดของแถบช่องว่างทางแสงจะกว้างมากขึ้นเมื่อความหนาของชั้นอากาศที่แทรกอยู่มีค่าเพิ่มมากขึ้น

การศึกษาส่วนต่อมาเป็นการศึกษาถึงสมบัติการส่งผ่านของสถานะบัพพร่องของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก ซึ่งชั้นบัพพร่องนั้นได้แก่ชั้นไดอิเล็กทริกซึ่งมีค่าไดอิเล็กทริกหรือดรรชนีหักเหหรือความหนาแตกต่างจากชั้นไดอิเล็กทริกภายในโครงสร้างแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริก จากการศึกษาด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอนพบว่าสเปกตรัมการส่งผ่านของโครงสร้างชนิดนี้มีลักษณะพิเศษคือมีค่าการส่งผ่านสูงสุดหรือโหนดข้อบัพพร่องเกิดขึ้นภายในบริเวณแถบช่องว่างทางแสงเนื่องจากปรากฏการณ์ Photon localization ภายในข้อบัพพร่อง โดยตำแหน่งของโหนดข้อบัพพร่องที่เกิดขึ้นสามารถกำหนดได้จากค่าไดอิเล็กทริกหรือดรรชนีหักเหของข้อบัพพร่องที่เพิ่มเข้าไปในโครงสร้าง โดยเมื่อข้อบัพพร่องมีดรรชนีหักเหสูงกว่าชั้นไดอิเล็กทริกอื่นๆ โหนดข้อบัพพร่องจะเกิดขึ้นในย่านความยาวคลื่นสั้น แต่เมื่อข้อบัพพร่องมีดรรชนีหักเหต่ำกว่าชั้นไดอิเล็กทริกอื่นๆ โหนดข้อบัพพร่องจะเกิดขึ้นในย่านความยาวคลื่นยาว นอกจากนี้ยังได้ทดลองเปลี่ยนความหนาของข้อบัพพร่องซึ่งเลือกใช้ซิลิกอนไดออกไซด์พบว่าเมื่อความหนาของข้อบัพพร่องลดลงโหนดข้อบัพพร่องจะเกิดขึ้นในย่านความยาวคลื่นสั้นและเมื่อความหนาของข้อบัพพร่องเพิ่มขึ้นโหนดข้อบัพพร่องจะเกิดขึ้นในย่านความยาวคลื่นยาว ต่อมาเมื่อทำการทดลองโดยเปลี่ยนจำนวนคาบของโครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกที่อยู่ทางด้านซ้ายและขวาของข้อบัพพร่องพบว่าจำนวนคาบมีผลต่อแบนด์วิธของโหนดข้อบัพพร่องที่เกิดขึ้น โดยเมื่อจำนวนคาบของโครงสร้างมากส่งผลให้แบนด์วิธของโครงสร้างยิ่งแคบลงแต่มีข้อเสียตรงที่เป็นการทำให้ค่าการส่งผ่านของโหนดข้อบัพพร่องมีค่าลดลงตามไปด้วย

การศึกษาส่วนสุดท้ายเป็นการนำสถานะบัพพร่องของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกไปประยุกต์ใช้เป็นส่วนประกอบของโครงสร้างเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ โดยมีข้อบัพพร่องทำหน้าที่เป็นโพรงกักเก็บและโครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกทางด้านซ้ายและขวาของข้อบัพพร่องทำหน้าที่เป็นกระจกสะท้อนแบบแบเรกที่มีคุณสมบัติในการเลือกย่านของคลื่นแสงที่ต้องการให้เกิดการสะท้อนมากที่สุดได้โดยการปรับจำนวนคาบของโครงสร้าง จากการทดลองออกแบบให้โครงสร้างดังกล่าวเกิดจากชั้นซิลิกอนไดออกไซด์และเงินความหนา 171.23 และ 10 นาโนเมตรตามลำดับ และข้อบัพพร่องเป็นซิลิกอนไดออกไซด์หนา 400 นาโนเมตรเพื่อให้เลเซอร์เอทพุทที่ได้เกิดในย่านแสงสีแดง จากการทดลองพบว่าสภาวะจุดเลเซอร์ขึ้นอยู่กับจำนวนคาบหรือค่าการสะท้อนของกระจกแบบแบเรก โดยกระจกที่มีค่าการสะท้อนสูงสามารถทำให้เกิดสภาวะจุดเลเซอร์ได้ง่ายกว่ากระจกที่มีค่าการสะท้อนต่ำ นอกจากนี้ค่าการสะท้อนของกระจกยังส่งผลต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบนด์วิธของสเปกตรัมเลเซอร์เอทช์พุทที่ได้ โดยโครงสร้างเลเซอร์ที่มีค่าการสะท้อนสูงมากที่สุด (โครงสร้างที่มีจำนวนคาบเท่ากับ 6) จะให้แบนด์วิธของเลเซอร์เอทช์พุทที่แคบมากที่สุดประมาณ 4 นาโนเมตรหรือมีความเป็นอาพันธ์สูงมาก แต่สเปกตรัมที่ได้มีค่าส่งต่ำที่สุด ดังนั้นการนำสถานะบัพพร้อมของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกมาประยุกต์เป็นเลเซอร์สารกึ่งตัวนำนั้นควรเลือกจำนวนคาบของโครงสร้างเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกมีค่าเท่ากับ 4 เพื่อให้เลเซอร์เอทช์พุทที่มีแบนด์วิธเหมาะสมกับการใช้งาน และมีค่าการส่งผ่านถึงประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ข้อดีของเลเซอร์เอทช์พุทจากโครงสร้างชนิดนี้ยังเป็นแบบโหมคเดี่ยวซึ่งดีกว่าเลเซอร์เอทช์พุทของโครงสร้างแบบ DFB ซึ่งให้เลเซอร์เอทช์พุทแบบโหมคคู่

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

จากผลการคำนวณในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงให้เห็นว่าสถานะบัพพร้อมของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกให้ค่าการส่งผ่านสูงสุดหรือโหมคข้อบัพพร้อมเกิดขึ้นภายในแถบช่องว่างทางแสง และสามารถเลือกความยาวคลื่นของโหมคข้อบัพพร้อมได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงชนิดหรือความหนาของข้อบัพพร้อม ดังนั้นจึงสามารถนำโครงสร้างชนิดนี้ประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอื่นๆ เช่น ตัวกรองสัญญาณแสง (Optical filter) โดยอาศัยชนิดและความหนาของข้อบัพพร้อมเป็นปัจจัยกำหนดความยาวคลื่นของสัญญาณแสงเอทช์พุทที่ต้องการให้ผ่านออกมาจากอุปกรณ์

และสำหรับงานวิจัยในอนาคตสามารถทำการศึกษาโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกเช่นเดิม เพียงแต่ทำการเปลี่ยนชั้นไดอิเล็กทริกและโลหะเป็นชนิดอื่นๆ เพื่อสังเกตสมบัติการส่งผ่านของโครงสร้างเหล่านี้และนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากโครงสร้างซึ่งเกิดจากชั้นไดอิเล็กทริกและโลหะแล้ววัสดุพอลิเมอร์ก็เป็นวัสดุที่น่าสนใจสำหรับการออกแบบโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง เนื่องจากวัสดุชนิดนี้เป็นวัสดุที่สามารถผลิตขึ้นได้ง่ายและมีราคาถูก รวมทั้งวัสดุพอลิเมอร์สามารถถูกสร้างเป็นโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงได้ด้วยกระบวนการการจัดเรียงตัวเอง (Self assembly) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการดำเนินงานในเชิงปฏิบัติการ

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. W. Haus, **Photonic band structures in Quantum Optics of confined systems**, M. Ducloy and D. Bloch, Eds., pp. 101-142, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands (1996).
- [2] J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J. N. Winn and R. D. Meade, **Photonic Crystals: Molding the flow of light 2nd Ed**, Princeton University Press, 2008, USA.
- [3] F. Scotognella, A. Monguzzi, M. Cucini, F. Meinardi, D. Comoretto, and R. Tubino, **One Dimensional Polymeric Organic Photonic Crystals for DFB Lasers**, International Journal of Photoenergy, 2008.
- [4] M. Scalora, M. J. Bloemer, A. S. Pethel, J. P. Dowling, C. M. Bowden, and A. S. Manka, **Transparent, metallo-dielectric, one-dimensional, photonic band-gap structures**, J. App. Phy. 83 (5) (1998) 2377.
- [5] M. J. Bloemer and M. Scalora, **Transmissive properties of Ag/SiO₂ photonic bands gaps**, J. App. Phy. 72 (14) (1998) 1676.
- [6] Chen Xian-feng, Shen Xiao-ming, Jiang Mei-ping, and Shi Du-fang, **Properties of defect mode and optical enhancement of 1D photonic crystals with a defect layer of negative refractive index material**, Optoelectronics Letters, Vol. 1, No. 3, 2005.
- [7] A. Petcu, and L. Preda, **The Optical Transmission of One-Dimensional Photonic Crystal**, Rom. Journ. Phys., Vol. 54, Nos. 5–6, P. 539–546, Bucharest, 2009.
- [8] A. Zamudio-Lara, J.J. Sanchez-Mondragon, M. Torres-Cisneros, J.J. Escobedo-Alatorre, C. Velasquez Ordonez, M.A. Basurto-Pensado, and L.A. Aguilera-Cortes, **Characterization of metal-dielectric photonic crystals**, Optical Materials 29, 60–64, 2006.
- [9] Zoran Jaksic, Milan Maksimovic, and Milija Sarajlic, **Metallodielectric Photonic Crystals as "Transparent Metal" Pass-Band Filters Near 320 nm**, XII Telecommunication Forum Telfor 2004, Belgrade, 25-27. 11. 2004.
- [10] P. Yeh, **Optical Waves in Layered Media** (John Wiley & Sons, 1991), Singapore.
- [11] I. A. Sukhoivanov and I. V. Guryev, **Photonic Crystals Physics and Practical Modeling**, Springer Series in Optical Sciences, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009.
- [12] M. Skorobogatiy and J. Yang, **Fundamentals of Photonic Crystal Guiding**, Cambridge University Press, 2009, UK.
- [13] E. D. Palik, **Handbook of Optical Constants of Solids** (Academic Press Inc, 1985), USA.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] Xia Li, Kang Xie, and Hai-Ming Jiang, **Properties of defect modes in one-dimensional photonic crystals containing two nonlinear defects**, Optics Communications 282, 4292–4295, 2009.
- [15] Fei Xu, and Yun-tuan Fang, **Standing Wave Localized within One-Dimensional Photonic Crystal with Defect**, Journal of Russian Laser Research, Vol. 28, No. 3, 2007.
- [16] Z. Y. Wang, X. M. Chen, X. Q. He, S. L. Fan, and W. Z. Yan, **Photonic Crystal Narrow Filters with Negative Refractive Index Structural Defects**, Progress In Electromagnetics Research, PIER 80, 421–430, 2008.
- [17] M.A. Ustyantsev, **Analysis and Design of Metallo-Dielectric Photonic Crystals**, Ph.D. Thesis, Universitat Rovira i Virgili, 2007.
- [18] Weidong Shen, Xuezheng Sun, Yueguang Zhang, Zhenyue Luo, Xu Liu, and Peifu Gu, **Narrow band filters in both transmission and reflection with metal/dielectric thin films**, Optics Communications 282, 242–246, 2009.
- [19] Su Chen, Yang Wang, Duanzheng Yao, and Zhitang Song, **Absorption enhancement in 1D Ag/SiO₂ metallic-dielectric photonic crystals**, Optica Applicata, Vol. XXXIX, No. 3, 2009.
- [20] Brian Schulkin, Laszlo Sztancsik, and John F. Federici, **Analytical solution for photonic band-gap crystals using Drude conductivity**, Am. J. Phys. 72 (7), July 2004.
- [21] C. E. Sunny, **Metallo-Dielectric Photonic Band Gap Structures Fabricated using RF Magnetron Sputtering Technology**, Master thesis, University of Dayton, Ohio, USA, 2005.
- [22] S. L. Chuang, **Physics of Photonic Devices 2nd ed**, John Wiley & Sons, 2009.
- [23] W. Withayachumnankul, B. M. Fischer, and D. Abbott, **Quarter-wavelength multilayer interference filter for terahertz waves**, Optics Communications 281, 2374–2379, 2008.
- [24] J. Salzman, and G. Lenz, **The Bragg Reflection Waveguide Directional Coupler**, IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 1, NO. 10, OCTOBER 1989.
- [25] <http://en.wikipedia.org/wiki/Light>
- [26] <http://www.lpn.cnrs.fr/en/PHOTONIQ/SourcesCP.php>
- [27] <http://arstechnica.com/science/news/2006/08/5088.ars>
- [28] <http://ab-initio.mit.edu/photons/>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างโปรแกรมคำนวณค่าการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน

```

%=====
%โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับคำนวณค่าการส่งผ่านของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสง
%=====
clear;
addpath c:\MATLAB6p5\toolbox\haus2;
%-----
%กำหนดช่วงความยาวคลื่นของคลื่นแสงที่ใช้ในการคำนวณ
%-----
v = [300 900 0 1];
%-----
%กำหนดค่าคงที่ต่างๆที่จำเป็นสำหรับการคำนวณ
%-----
d1 = 171.23; %ความหนาของชั้น SiO2
d2 = 10; %ความหนาของชั้น Ag
m = 5; %จำนวนคาบของโครงสร้าง
fi0 = 0; %มุมตกกระทบของคลื่นแสงเทียบกับเส้นปกติ (เรเดียน)
n00 = [1. 1. 1. 1. 1.]; %ดัชนีหักเหของระนาบที่คลื่นแสงตกกระทบ (อากาศ)
lambda = v(1):.5:v(2);
ld0 = [180 500 600 800 6100];
%-----
%กำหนดค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนของชั้น ไดอิเล็กทริก, โลหะ และฐานรองของโครงสร้าง
%-----
n10 = [1.46 1.46 1.46 1.46 1.46]; %ส่วนจริงของดัชนีหักเหเชิงซ้อนของ SiO2
k10 = [0.0 0.0 0.0 0.0 0.0]; %ส่วนจินตภาพของดัชนีหักเหเชิงซ้อนของ SiO2
n20 = [0.06 0.06 0.06 0.06 0.06]; %ส่วนจริงของดัชนีหักเหเชิงซ้อนของ Ag
k20 = [3.75 3.75 3.75 3.75 3.75]; %ส่วนจินตภาพของดัชนีหักเหเชิงซ้อนของ Ag
n30 = [1.0 1.0 1.0 1.0 1.0]; %ดัชนีหักเหของฐานรอง (เป็นจำนวนจริงเท่านั้น)
%-----
%ฟังก์ชันการคำนวณดัชนีหักเหของตัวกลางแต่ละชนิดที่ความยาวคลื่นต่างๆ
%-----

```

```

n0 = interp1(ld0, n00, lambda);
n1 = interp1(ld0, n10, lambda);
k1 = interp1(ld0, k10, lambda);
n2 = interp1(ld0, n20, lambda);
k2 = interp1(ld0, k20, lambda);
n3 = interp1(ld0, n30, lambda);

%-----
%ฟังก์ชันการคำนวณค่าการสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นโพลาไรซ์แบบ p และแบบ s โดยเรียก
%คำสั่งจากโปรแกรมย่อย

%-----

[Tp,Rp,Ts,Rs] = f_2mlyr(n0, n1, k1, n2, k2, n3, d1, d2, m, fi0, lambda);

%-----
%ฟังก์ชันการพลอตกราฟสเปกตรัมการส่งผ่านของคลื่นโพลาไรซ์แบบ p และแบบ s
%-----

figure(1);
hold on;
plot(lambda, Ts, 'b-', lambda, Tp, 'r-');
title('Silicon substrate');
ylabel('Transmission');
xlabel('Wavelength (nm)');
legend('TE wave','TM wave');
grid on;
axis(v);

%=====
%ฟังก์ชันย่อยซึ่งถูกเรียกจาก โปรแกรมหลักสำหรับการคำนวณค่าการสะท้อนและการส่งผ่าน
%=====

function [Tp, Rp, Ts, Rs]=f_2mlyr(n0, n1, k1, n2, k2, n3, d1, d2, m, fi0, lambda)
for n = 1:length (lambda)
    fi1 = asin(sin(fi0)*n0(n)/(n1(n) + i*k1(n)));
    phi1(n) = fi1;
    fi2 = asin(sin(fi0)*n0(n)/(n2(n) + i*k2(n)));
    phi2(n) = fi2;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

fi3 = asin(sin(fi0)*n0(n)/n3(n));
phi3(n) = fi3;
[r01p, t01p, r01s, t01s] = f_rtamp(n0(n), 0, n1(n), k1(n), fi0, fi1);
[r12p, t12p, r12s, t12s] = f_rtamp(n1(n), k1(n), n2(n), k2(n), fi1, fi2);
[r21p, t21p, r21s, t21s] = f_rtamp(n2(n), k2(n), n1(n), k1(n), fi2, fi1);
[r23p, t23p, r23s, t23s] = f_rtamp(n2(n), k2(n), n3(n), 0, fi2, fi3);
delta01 = 0;
delta12 = 2*pi*(n1(n) - i*k1(n))*d1*cos(fi1)/lambda(n);
delta21 = 2*pi*(n2(n) - i*k2(n))*d2*cos(fi2)/lambda(n);
delta23 = 2*pi*(n2(n) - i*k2(n))*d2*cos(fi2)/lambda(n);
C01p = [1 r01p; r01p 1];
C12p = [exp(i*delta12) r12p*exp(i*delta12); r12p*exp(-i*delta12) exp(-i*delta12)];
C21p = [exp(i*delta21) r21p*exp(i*delta21); r21p*exp(-i*delta21) exp(-i*delta21)];
C23p = [exp(i*delta23) r23p*exp(i*delta23); r23p*exp(-i*delta23) exp(-i*delta23)];
Ap = C01p*C12p;
tp = t01p*t12p;
for j = 1:m - 1
    Ap = Ap*C21p*C12p;
    tp = tp*t21p*t12p;
end
Ap = Ap*C23p;
tp = tp*t23p;
Rp(n) = abs(Ap(2,1)/Ap(1,1))^2;
Tp(n) = n3(n)*cos(fi3)/n0(n)/cos(fi0)*abs(tp/Ap(1,1))^2;
C01s = [1 r01s; r01s 1];
C12s = [exp(i*delta12) r12s*exp(i*delta12); r12s*exp(-i*delta12) exp(-i*delta12)];
C21s = [exp(i*delta21) r21s*exp(i*delta21); r21s*exp(-i*delta21) exp(-i*delta21)];
C23s = [exp(i*delta23) r23s*exp(i*delta23); r23s*exp(-i*delta23) exp(-i*delta23)];
As = C01s*C12s;
ts = t01s*t12s;
for j = 1:m - 1
    As=As*C21s*C12s;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    ts = ts*t21s*t12s;

end
As = As*C23s;      %เมทริกซ์ถ่าย โอนของ โครงสร้างทั้งหมด
ts = ts*t23s;
Rs(n) = abs(As(2,1)/As(1,1))^2;
Ts(n) = n3(n)*cos(fi3)/n0(n)/cos(fi0)*abs(ts/As(1,1))^2;

end

%=====
%ฟังก์ชันย่อยสำหรับการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การสะท้อนและการส่งผ่านแบบเฟรชเนลล์สำหรับ
%นำไปใช้คำนวณค่าการสะท้อนและการส่งผ่าน
%=====

function [rp, tp, rs, ts] = f_rtamp(n1, k1, n2, k2, fi1, fi2)
n1 = n1 - i*k1;
n2 = n2 - i*k2;
rp = (n1*cos(fi2) - n2*cos(fi1))/(n1*cos(fi2) + n2*cos(fi1));
rs = (n1*cos(fi1) - n2*cos(fi2))/(n1*cos(fi1) + n2*cos(fi2));
tp = 2*n1*cos(fi1)/(n1*cos(fi2) + n2*cos(fi1));
ts = 2*n1*cos(fi1)/(n1*cos(fi1) + n2*cos(fi2));

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างโปรแกรมคำนวณค่าการส่งผ่านของสถานะบัพพร้อมของโครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงแบบเมทัลโล-ไดอิเล็กทริกด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน

```

%=====
%โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับคำนวณค่าการส่งผ่านของสถานะบัพพร้อมของ โครงสร้างแถบ
%ช่องว่างทางแสง
%=====
clear;
addpath c:\MATLAB6p5\toolbox\haus2;
%-----
%กำหนดช่วงความยาวคลื่นของคลื่นแสงที่ใช้ในการคำนวณ
%-----
v = [300 900 0 1];
%-----
%กำหนดค่าคงที่ต่างๆที่จำเป็นสำหรับการคำนวณ
%-----
d1 = 171.23; %ความหนาของชั้น SiO2
d2 = 10; %ความหนาของชั้น Ag
d3 = 450; %ความหนาของชั้นบัพพร้อม (SiO2)
m = 5; %จำนวนคาบของโครงสร้างทางด้านซ้ายและขวาชั้นบัพพร้อม
fi0 = 0; %มุมตกกระทบของคลื่นแสงเทียบกับเส้นปกติ (เรเดียน)
n00 = [1. 1. 1. 1. 1.]; %ดัชนีหักเหของระนาบตกกระทบ (อากาศ)
lambda = v(1):.5:v(2);
ld0 = [180 500 600 800 6100];
%-----
%กำหนดค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนของชั้น ไดอิเล็กทริก, โลหะ และฐานรองของ โครงสร้าง
%-----
n10 = [1.46 1.46 1.46 1.46 1.46]; %ส่วนจริงของดัชนีหักเหเชิงซ้อนของ SiO2
k10 = [0.0 0.0 0.0 0.0 0.0]; %ส่วนจินตภาพของดัชนีหักเหเชิงซ้อนของ SiO2
n20 = [0.05 0.05 0.05 0.05 0.05]; %ส่วนจริงของดัชนีหักเหเชิงซ้อนของ Ag
k20 = [2.87 2.87 2.87 2.87 2.87]; %ส่วนจินตภาพของดัชนีหักเหเชิงซ้อนของ Ag
n30 = [1.46 1.46 1.46 1.46 1.46]; %ส่วนจริงของดัชนีหักเหเชิงซ้อนของชั้นบัพพร้อม
k30 = [0.0 0.0 0.0 0.0 0.0]; %ส่วนจินตภาพของดัชนีหักเหเชิงซ้อนของ

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

%ข้อบกพร่อง

n40 = [1. 1. 1. 1. 1.];

%ค่าครรชนีหักเหของฐานรอง (เป็นจำนวนจริงเท่านั้น)

%-----

%ฟังก์ชันการคำนวณครรชนีหักเหของตัวกลางแต่ละชนิดที่ความยาวคลื่นต่างๆ

%-----

n0 = interp1(ld0, n00, lambda);

n1 = interp1(ld0, n10, lambda);

k1 = interp1(ld0, k10, lambda);

n2 = interp1(ld0, n20, lambda);

k2 = interp1(ld0, k20, lambda);

n3 = interp1(ld0, n30, lambda);

k3 = interp1(ld0, k30, lambda);

n4 = interp1(ld0, n40, lambda);

%-----

%ฟังก์ชันการคำนวณค่าการสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่น โพลาร์ไรซ์แบบ p และแบบ s

%-----

for n = 1:length(lambda)

fi1 = asin(sin(fi0)*n0(n)/(n1(n) + i*k1(n)));

phi1(n) = fi1;

fi2 = asin(sin(fi0)*n0(n)/(n2(n) + i*k2(n)));

phi2(n) = fi2;

fi3 = asin(sin(fi0)*n0(n)/(n3(n) + i*k3(n)));

phi3(n) = fi3;

fi4 = asin(sin(fi0)*n0(n)/n4(n));

phi4(n) = fi4;

%-----

%ฟังก์ชันการคำนวณสัมประสิทธิ์การสะท้อนและการส่งผ่านแบบเฟรชเนล

%-----

[r01p, t01p, r01s, t01s] = f_rtamp(n0(n), 0, n1(n), k1(n), fi0, fi1);

[r12p, t12p, r12s, t12s] = f_rtamp(n1(n), k1(n), n2(n), k2(n), fi1, fi2);

[r21p, t21p, r21s, t21s] = f_rtamp(n2(n), k2(n), n1(n), k1(n), fi2, fi1);

[r23p, t23p, r23s, t23s] = f_rtamp(n2(n), k2(n), n3(n), k3(n), fi2, fi3);

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
[r32p, t32p, r32s, t32s] = f_rtamp(n3(n), k3(n), n2(n), k2(n), fi3, fi2);
```

```
[r14p, t14p, r14s, t14s] = f_rtamp(n1(n), k1(n), n4(n), 0, fi1, fi4);
```

```
delta01=0;
```

```
delta12=2*pi*(n1(n) - i*k1(n))*d1*cos(fi1)/lambda(n);
```

```
delta21=2*pi*(n2(n) - i*k2(n))*d2*cos(fi2)/lambda(n);
```

```
delta23=2*pi*(n2(n) - i*k2(n))*d2*cos(fi2)/lambda(n);
```

```
delta32=2*pi*(n3(n) - i*k3(n))*d3*cos(fi3)/lambda(n);
```

```
delta14=2*pi*(n1(n) - i*k1(n))*d1*cos(fi1)/lambda(n);
```

```
%-----
```

```
%ฟังก์ชันการคำนวณค่าการส่งผ่านของสถานะบัพพร้อมของโครงสร้างกรณิคลิน โพลาริซแบบ p
```

```
%-----
```

```
C01p = [1 r01p; r01p 1];
```

```
C12p = [exp(i*delta12) r12p*exp(i*delta12); r12p*exp(-i*delta12) exp(-i*delta12)];
```

```
C21p = [exp(i*delta21) r21p*exp(i*delta21); r21p*exp(-i*delta21) exp(-i*delta21)];
```

```
C23p = [exp(i*delta23) r23p*exp(i*delta23); r23p*exp(-i*delta23) exp(-i*delta23)];
```

```
C32p = [exp(i*delta32) r32p*exp(i*delta32); r32p*exp(-i*delta32) exp(-i*delta32)];
```

```
C14p = [exp(i*delta14) r14p*exp(i*delta14); r14p*exp(-i*delta14) exp(-i*delta14)];
```

```
Ap = C01p*C12p;
```

```
tp = t01p*t12p;
```

```
for j = 1:m - 1
```

```
    Ap = Ap*C21p*C12p;
```

```
    tp = tp*t21p*t12p;
```

```
end
```

```
Ap = Ap*C23p*C32p*C21p;
```

```
tp = tp*t23p*t32p*t21p;
```

```
for j = 1:m - 1
```

```
    Ap = Ap*C12p*C21p;
```

```
    tp = tp*t12p*t21p;
```

```
end
```

```
Ap = Ap*C14p;
```

```
%เมทริกซ์ถ่าย โอนของ โครงสร้างทั้งหมด
```

```
tp = tp*t14p;
```

```
Rp(n) = abs(Ap(2,1)/Ap(1,1))^2;
```

```
%ค่าการสะท้อนของ โครงสร้างทั้งหมด
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Tp(n) = n4(n)*cos(fi4)/n0(n)/cos(fi0)*abs(tp/As(1,1))^2;%ค่าการส่งผ่านของ โครงสร้างทั้งหมด
%-----
%ฟังก์ชันการคำนวณค่าการส่งผ่านของสถานะบัพพร้อมของ โครงสร้างกรณีคลื่น โพลาริซ์แบบ s
%-----

C01s = [1 r01s; r01s 1];
C12s = [exp(i*delta12) r12s*exp(i*delta12); r12s*exp(-i*delta12) exp(-i*delta12)];
C21s = [exp(i*delta21) r21s*exp(i*delta21); r21s*exp(-i*delta21) exp(-i*delta21)];
C23s = [exp(i*delta23) r23s*exp(i*delta23); r23s*exp(-i*delta23) exp(-i*delta23)];
C32s = [exp(i*delta32) r32s*exp(i*delta32); r32s*exp(-i*delta32) exp(-i*delta32)];
C14s = [exp(i*delta14) r14s*exp(i*delta14); r14s*exp(-i*delta14) exp(-i*delta14)];

As = C01s*C12s;
ts = t01s*t12s;
for j = 1:m - 1
    As = As*C21s*C12s;
    ts = ts*t11s*t12s;
end
As = As*C23s*C32s*C21s;
ts = ts*t23s*t32s*t21s;
for j = 1:m - 1
    As = As*C12s*C21s;
    ts = ts*t12s*t21s;
end
As = As*C14s; %เมทริกซ์ถ่าย โอนของ โครงสร้างทั้งหมด
ts = ts*t14s;

Rs(n) = abs(As(2,1)/As(1,1))^2; %ค่าการสะท้อนของ โครงสร้างทั้งหมด
Ts(n) = n4(n)*cos(fi4)/n0(n)/cos(fi0)*abs(ts/As(1,1))^2; %ค่าการส่งผ่านของ โครงสร้างทั้งหมด
end
%-----
%ฟังก์ชันการพลอตกราฟสเปกตรัมการส่งผ่านของคลื่น โพลาริซ์แบบ p และแบบ s
%-----

figure(1);
hold on;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

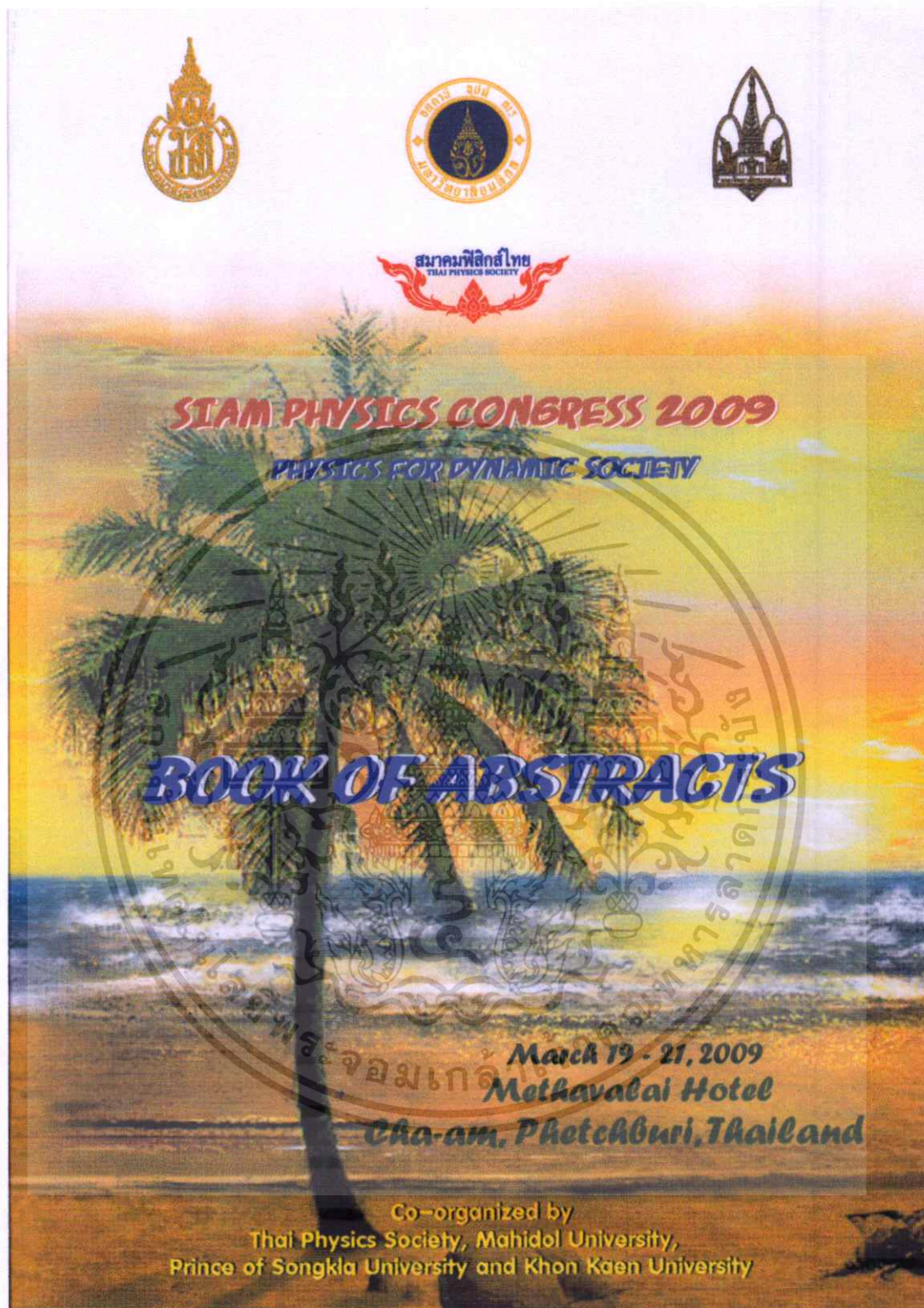
plot(lambda, Tp, 'r-', lambda, Ts, 'k-');
title('The defect state of MD-PBG structure');
ylabel('Transmission');
xlabel('Wavelength (nm)');
grid on;
axis(v);
%=====
%ฟังก์ชันย่อยสำหรับการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การสะท้อนและการส่งผ่านแบบเฟรชเนลสำหรับ
%นำไปใช้คำนวณค่าการสะท้อนและการส่งผ่าน
%=====
function [rp, tp, rs, ts] = f_ramp(n1, k1, n2, k2, fi1, fi2)
n1 = n1 - i*k1;
n2 = n2 - i*k2;
rp = (n1*cos(fi2) - n2*cos(fi1))/(n1*cos(fi2) + n2*cos(fi1));
rs = (n1*cos(fi1) - n2*cos(fi2))/(n1*cos(fi1) + n2*cos(fi2));
tp = 2*n1*cos(fi1)/(n1*cos(fi2) + n2*cos(fi1));
ts = 2*n1*cos(fi1)/(n1*cos(fi1) + n2*cos(fi2));

```



ภาคผนวก ข.
งานวิจัยที่ได้เข้าร่วมนำเสนอในการประชุมวิชาการระดับชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Metallo-Dielectric Photonic Band Gap Structure Simulation Using Transfer Matrix Method and Bloch Functions

S. Wicharn¹, P. Buranasiri^{1*}, W. Yindeesuk¹, C. E. Sunny²,
A. M. Sarangan², J. W. Haus²

¹Applied Physics Department, Faculty of Science,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand
²Electro-Optic Program, University of Dayton, Ohio, USA

Abstract

Transfer matrix method (TMM) has been used to calculate electromagnetic scattering in multi-layered thin films or one dimensional photonic crystal (1-D PCs). Our 1-D PCs are periodic metallo-dielectric structure, which is composed of silver (Ag) and silicon dioxide (SiO₂). The thickness of Ag and SiO₂ are 69.52 and 100 nm respectively. The simulations predict clearly band gap structure when the numbers of layer get larger. The percentage of transmission spectra depend on the substrate used. The changing of the angles cause the shifting of the band gap centred wavelength. In addition, the Bloch functions have been used to compute its band structures in both TE and TM modes.

Keyword: transfer matrix method, photonic band gap, metallo-dielectric, photonic crystal

1 INTRODUCTION

Photonic Band Gap (PBG) structure or one dimensional photonic crystal is the periodic structure of two alternating dielectric materials with refractive index contrast in one dimension as shown in Fig.1. The thickness of two dielectric materials is a fraction of the size of the reference wavelength, usually one quarter of reference wavelength. As a consequence of this arrangement of the dielectric layers, interference effects cause some wavelengths to be transmitted, while a range of wavelengths centre about reference wavelength, often called "band gap" wavelengths, are completely reflected. So that light can be trapped and attracted inside this periodic structure.

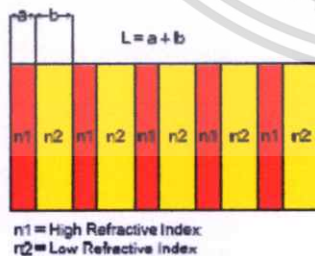


Fig.1 One dimensional Photonic Band Gap structure

Typically, the materials used in the fabrication of PBG structures are dielectric or semiconductor substances, due to their low absorption characteristics. The choice of materials is most often control by a specific need, material properties or by available fabrication techniques.

However, that the materials used should not absorb light to any significant extent. For this reason, metallic substances are almost exclusively used to enhance the reflective properties of dielectric or semiconductor materials by designing and incorporating within a particular device thin metallic film, such as silver, nickel, copper, aluminium or gold [1]. This periodic structure was called "Metallo Dielectric-Photonic Band Gap (MD-PBG)" structure.

The MD-PBG structure, recently, has been used in a lot of applications, such as window layer and back contact layer in a thin film solar cell for broaden wavelength absorption, and the back reflection for enhance optical path length [2] [3], respectively. Moreover, the photonic crystal Bragg structure has been used for single mode lasing with satisfies both transverse and longitudinal Bragg conditions [4].

2 THEORIES

2.1 Transfer Matrix Method for MD-PBG

The MD-PBG structures were designed using the Transfer Matrix Method (TMM) [5] because the TMM is a more effective and non-complex method. We will first analyze one - dimension as shown in Fig.1. This is a stack of an alternating layer of high and low refractive index material. Each layer of the stack is characterized by refractive index n_n and thickness d_n , where n indicates the n^{th} layer. First, we will consider electromagnetic wave incident on the PBG

perpendicular to the layer's surface plane, along the z axis. In each layer there will be two wave propagating in the forward and backward direction with complex amplitude A_n and B_n . As a wave propagates across a layer, the phase is changed as shown in Fig.2.

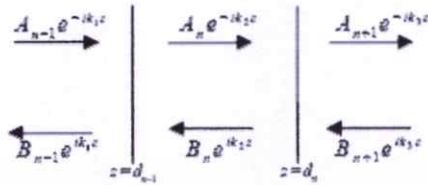


Fig.2 Field amplitudes at the interface between layer n-1, n and n+1

The electric field and its derivatives are continuous at the interface between layer n-1, and n so that,

$$A_{n-1}e^{-ik_1d_{n-1}} + B_{n-1}e^{ik_1d_{n-1}} = A_n e^{-ik_2d_{n-1}} + B_n e^{ik_2d_{n-1}} \quad (1)$$

$$-ik_1 A_{n-1}e^{-ik_1d_{n-1}} - ik_1 B_{n-1}e^{ik_1d_{n-1}} = -ik_2 A_n e^{-ik_2d_{n-1}} - ik_2 B_n e^{ik_2d_{n-1}} \quad (2)$$

The incident field amplitudes are related to the field amplitudes at layer N by multiplication of a series of matrices where each matrix contains the thickness d_n and the index n_n of each layer in the film.

$$\begin{bmatrix} A_0 \\ B_0 \end{bmatrix} = \prod_{n=1}^N M_n \begin{bmatrix} A_N \\ B_N \end{bmatrix} \quad (3)$$

Since the left traveling wave in the last layer is typically zero, if we assume the incident field to have amplitude of 1, we can write

$$\begin{bmatrix} 1 \\ r \end{bmatrix} = M_N \begin{bmatrix} t \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

The reflection and transmission coefficient of a general multilayer film with a total of N layer can be written as below.

$$r = -\frac{M_{21}}{M_{22}} \quad (5)$$

$$t = M_{11} - \frac{M_{12}M_{21}}{M_{22}} \quad (6)$$

2.2 Bloch functions

To study the propagation of electromagnetic waves in one dimensional PBG, let us consider a periodic structure (Fig.1) of alternating layers of two materials with different refractive index

contrast n_1 and n_2 respectively, a and b are the thickness of two layers respectively and $L = a + b$.

Suppose an electromagnetic wave propagate along z axis and incident on the interface of a one dimensional PBG with incident angle θ_0 . We assume that the wave vector has components only in x and z directions. Then following the Bloch functions [5], the dispersion relation for this PBG of both TE and TM modes is given by

$$K_{TE} = \frac{1}{L} \cos^{-1} \left[\cos(k_1 a) \cos(k_2 b) - \frac{1}{2} \left(\frac{k_1}{k_2} + \frac{k_2}{k_1} \right) \sin(k_1 a) \sin(k_2 b) \right] \quad (7)$$

$$K_{TM} = \frac{1}{L} \cos^{-1} \left[\cos(k_1 a) \cos(k_2 b) - \frac{1}{2} \left(\frac{k_1 n_1^2}{k_2 n_2^2} + \frac{k_2 n_2^2}{k_1 n_1^2} \right) \sin(k_1 a) \sin(k_2 b) \right] \quad (8)$$

Where $k_i = \frac{n_i \omega}{c} \cos \theta_i$ is the wave vector in i layer

L is the periodic length

3 SIMULATION RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Transmittance of MD-PBG structure

The numerical results for finding the transmittance of one dimensional photonic band gap structures that compose of Ag and SiO₂ layers was calculated by transfer matrix method (TMM). In this order, let thickness of Ag and SiO₂ thin films are a = 69.52 nm and b = 100.00 nm respectively and we used the data of refractive index from [6]. Other parameters such as the number of layers, incident angle of electromagnetic wave and types of substrate will be effected to the transmittance as show in the figures and described below.

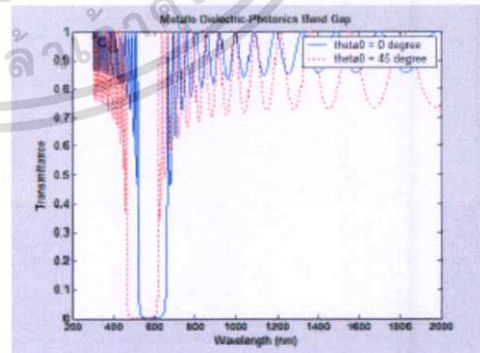


Fig.2 the effect of incident angle to the transmittance when incident angle is 0 and 45 degree.

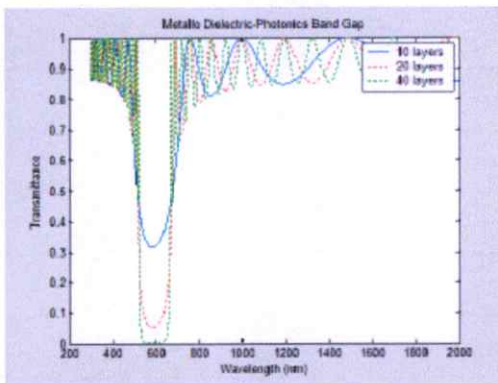


Fig.3 the effect of number of layer to the transmittance when number of layer is 10, 30 and 60 layers.

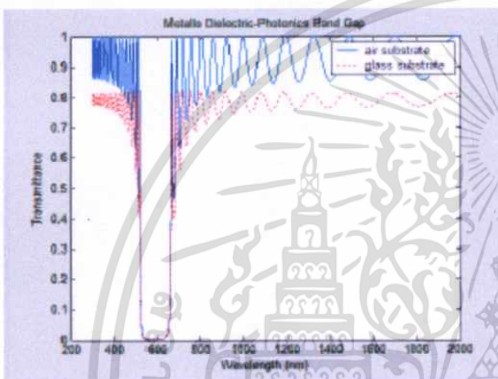


Fig.4 the effect of type of substrate to the transmittance when choosing air and glass substrate.

Fig.2 show the transmittance of electromagnetic wave in order the incident angle is 0 and 45 degree compared with z - axis. For this periodic structure, let the number of layers is 40 and substrate is air. The calculation results show that in case of incident angle equal 45 degree, the band gap have been shifted to blue region (Blue shift). So that if incident angle have been increased, the band gap will be more shifted to blue region. Moreover graphs in Fig.1 show the bandwidth of band gap is equal to periodic length or total thickness of Ag and SiO_2 thin films.

Fig.3 shows the effect of number of layers to transmittance. For this periodic structure, let incident angle is 0 degrees compare with z - axis and substrate of structure is air. The calculation results show the transmittance of 10 layers, 20 layers and 40 layers structures. The band gap transmittance of 10 layers structure was not equal to zero (In ideal MD-PBG structure have the band gap transmittance is equal to zero) while the band gap of 20 and 40 layers structures have closed to zero transmittance. Thus the number of layer will be affected to band gap transmittance.

Finally, Fig.4 shows the effect from types of substrate to transmittance. In this study will compare the transmittance from periodic structure that uses air substrate and glass slide substrate. In this case, let number of layer is 40 and incident angle is 0 degree. The calculation results showing glass slide substrate will decrease transmittance and approximately remain 80% while air substrate structure has 100% transmission.

3.2 BAND STRUCTURES OF MD-PBG

In this case, we computed the band structure in MD-PBG structure for both TE and TM modes using Bloch functions or equation (7) and (8), respectively. The results show band structure and dispersion relation between normalized frequency versus incident angle of electromagnetic wave and band gap or forbidden band at any frequency as shown in Fig.4 and Fig.5.

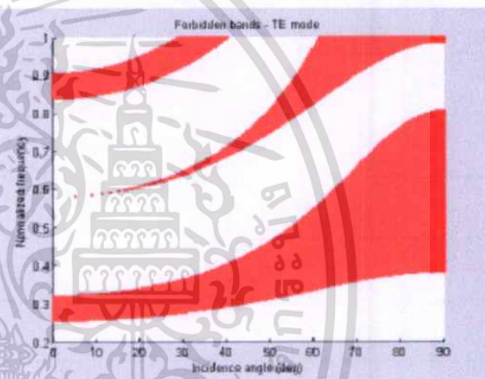


Fig.5 the dispersion relation of normalized frequencies vs. incidence angles and band gaps in MD-PBG structure of TE mode.

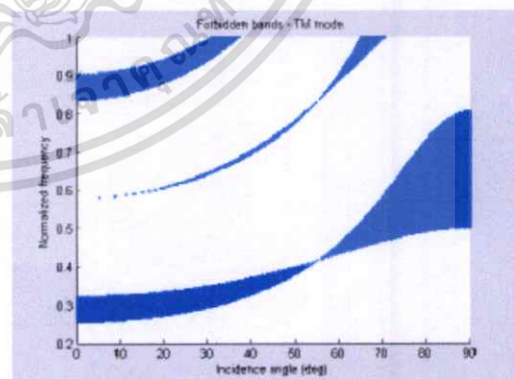


Fig.6 the dispersion relation of normalized frequencies vs. incidence angles and band gaps in MD-PBG structure of TM mode.

From dispersion relation in Fig.5 and Fig.6 at 0 degree incident angle have two clearly narrow band gaps and when increasing an incident angle, the position of centred band gap will be change from the initial position to other positions into

higher frequency (or shorter wavelength) that corresponding to the simulation results in previous part for both TE and TM modes. This calculation results show us to know for choosing the incidence angle at any frequencies.

4 CONCLUSION

Finally, from the computational results with TMM, we can conclude the factors that have been affected to the transmittance of this MD-PBG structure are incident angle of electromagnetic wave, number of layers and type of substrate. Moreover, we can use the Bloch functions to compute the band structure of MD-PBG structure for both TE and TM modes as well.

REFERENCES

- [1] M. Scalora, M. J. Bloemer, A. S. Pethel, J. P. Dowling, C. M. Bowden, and A. S. Manka, Transparent, metallo-dielectric, one-dimensional, photonic band-gap structures, *J. App. Phys.* 83 (5) (1998) 2377.
- [2] L. Zeng, Y. Yi, C. Hong, J. Liu, N. Feng, X. Duan, L. C. Kimerling, and B. A. Alamariu, Efficiency enhancement in Si solar cells by texture photonic crystal back reflector, *J. App. Phys.* 89 (11) (2006) 111111.
- [3] D. Zhou and R. Biswas, Photonic crystal enhance light-trapping in thin film solar cells, *J. App. Phys.* 103 (9) (2008) 093102.
- [4] L. Zhu, Photonic crystal Bragg laser: design, fabrication and characterization, PhD thesis, California Institute of Technology, California, USA, 2008
- [5] P. Yeh, *Optical Waves in Layered Media* (John Wiley & Sons, 1991), Singapore.
- [6] E. D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids* (Academic Press Inc, 1985), USA



SIAM PHYSICS CONGRESS 2010

Physics for Creative Society

Kanchanaburi, THAILAND, March 25-27, 2010

ABSTRACTS



Organized by



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The defect state of metallo-dielectric photonic band gap structure and its applications in optoelectronic devices

S. Wicharn^{1,*}, P. Buranasiri¹, J. W. Haus²

¹*School of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand*

²*Electro-Optics program, University of Dayton, Ohio, USA*

In this study, we have been numerically investigated the defect state of one dimensional, metallo-dielectric photonic band gap (MD-PBG) structure that consist of a stack in between alternating layers of a silicon oxide and silver material, such that the complex refractive index alternates between a high and low value. In this project, the transfer matrix method (TMM) has been used as the numerical tool. By adding the defect say a stack of silicon oxide, which is larger than the others that used in this periodic structure, the periodical property of the MD-PBG structure has been damaged, which results the photon localization observed in the perturb piece due to the multiple scattering and interference of light. In addition, a sharp transmission peak of light at near center of the band gap has been observed. The result shows that the defect state of MD-PBG structure may be used as the cavity of semiconductor laser for improving its coherence.

Keywords: transfer matrix method, metallo-dielectric photonic band gap, defect state, semiconductor laser.

1. INTRODUCTION

Photonic Band Gap (PBG) structures are the periodic structures that compose of two different dielectric layers. These structures are used to control and manipulate the light propagation. They have two basic characteristics such as the band gap like the forbidden band in solid crystals. The phenomenon that some frequencies of light cannot propagate through a periodic structure is called photonic band gap. The photon localization presents the possibility to make some discontinuous electromagnetic wave appear in the band gap and this phenomenon is called "defect state" of PBG structure. As we known, if a defect layer is added into perfect PBG structure, defect state will be observed. Following are some methods, which people have been used for making the defect state in PBG structures, by changing the thickness of a layer, removing some layers from the structure, or inserting another layer into the structure [1]. The defect state of PBG structure has been applied in many aspects, such as narrow band pass filters, optical switches, optical wavelength division multiplexers and semiconductor laser structures.

In this work, we have been explored the defect state of a PBG structure composed of dielectric

layers (silica: SiO₂) and metallic layers (silver: Ag). This kind of PBG structures is called "Metallo Dielectric-Photonic Band Gap (MD-PBG) structures. Due to the reflectance of metallic is larger than that of dielectric [2], the band gap width of MD-PBG structures are larger than the band gap of ordinary PBG structures. The defect state of MD-PBG structures is generated by inserting a large silica layer into this structure and then has been investigated. From the result, we have observed the narrow transmission wavelength in the band gap and is called "defect mode". Due to the properties and the mechanism of the defect state of MD-PBG structure, the structure can be used to improve the coherence properties of the distributed Bragg reflector (DBR) semiconductor laser.

2. THEORIES

2.1 MD-PBG structure with defect layer

The structure under consideration is a one dimensional MD-PBG structure with a defect layer, as shown in Fig.1, where H stands for layers with high refractive index or silica layers and the thickness $d_H = 170$ nm, and L stands for layers with low refractive index or silver layers and the thickness $d_L = 10$ nm. The complex refractive indices from ref [3] have been used. The two layers H and L stand for one unit cell

*Corresponding author. Tel: +66865534132

E-mail: soluzion13@hotmail.com

and have a period equal to T . The middle layer has the same refractive index as the H layer and its thickness is $d_D = 2d_H = 340$ nm. So that, the structure can be written as $(HL)^5 H^2 (LH)^5$ with middle layer being a defect layer in the MD-PBG structure as shown in Fig.1.

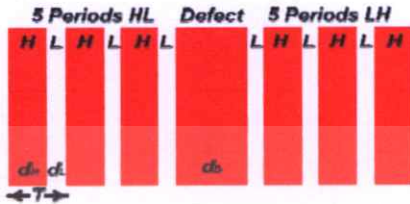


FIGURE 1. Schematic diagram of MD-PBG structure with defect layer. In this figure, we just draw only 3 periods of HL and LH instead of 5 periods.

2.2 Transfer matrix method

In this work, the transfer matrix method (TMM) [4], [5] has been used to calculate the transmission spectrum of structure in Fig.1. Here, the light wave normal incident on the left hand side of the MD-PBG structure. The incident fields and transmitted fields as

$$\begin{bmatrix} A_i \\ B_i \end{bmatrix} = M_{HL}^5 M_D M_{LH}^5 \begin{bmatrix} A_t \\ B_t \end{bmatrix} \quad (1)$$

where A_i and B_i are the forward and backward propagation incident fields, A_t and B_t are the forward and backward propagation transmitted fields and M_{HL} , M_{LH} and M_D are 2×2 matrices and called transfer matrices for light propagating through two 5 periods structure and defect layer respectively and they given by

$$M_{HL} = \begin{bmatrix} e^{ik_H d_H} \left(\cos k_L d_L + \frac{1}{2} i \left(\frac{k_H}{k_L} + \frac{k_L}{k_H} \right) \sin k_L d_L \right) \\ e^{ik_H d_H} \left(-\frac{1}{2} i \left(\frac{k_H}{k_L} - \frac{k_L}{k_H} \right) \sin k_L d_L \right) \\ e^{-ik_H d_H} \left(\frac{1}{2} i \left(\frac{k_H}{k_L} - \frac{k_L}{k_H} \right) \sin k_L d_L \right) \\ e^{-ik_H d_H} \left(\cos k_L d_L - \frac{1}{2} i \left(\frac{k_H}{k_L} + \frac{k_L}{k_H} \right) \sin k_L d_L \right) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$M_{LH} = \begin{bmatrix} e^{ik_L d_L} \left(\cos k_H d_H + \frac{1}{2} i \left(\frac{k_L}{k_H} + \frac{k_H}{k_L} \right) \sin k_H d_H \right) \\ e^{ik_L d_L} \left(-\frac{1}{2} i \left(\frac{k_L}{k_H} - \frac{k_H}{k_L} \right) \sin k_H d_H \right) \\ e^{-ik_L d_L} \left(\frac{1}{2} i \left(\frac{k_L}{k_H} - \frac{k_H}{k_L} \right) \sin k_H d_H \right) \\ e^{-ik_L d_L} \left(\cos k_H d_H - \frac{1}{2} i \left(\frac{k_L}{k_H} + \frac{k_H}{k_L} \right) \sin k_H d_H \right) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$M_D = \frac{1}{2} i \begin{bmatrix} \left(\frac{k_L^2 + k_D^2}{k_L k_D} \right) e^{ik_D d_D} & \left(\frac{k_L^2 - k_D^2}{k_L k_D} \right) e^{-ik_D d_D} \\ -\left(\frac{k_L^2 - k_D^2}{k_L k_D} \right) e^{ik_D d_D} & -\left(\frac{k_L^2 + k_D^2}{k_L k_D} \right) e^{-ik_D d_D} \end{bmatrix} \quad (4)$$

with $k_j = \frac{\omega}{c} n_j \cos \theta_j$ is the wave vector in j layer where $j = H, L$ and D .

Then, the three matrices product (M_{HL} , M_{LH} and M_D) can be written as a matrix. Now the transfer matrix equation in Eq. (1) can be written as

$$\begin{bmatrix} A_i \\ B_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_t \\ B_t \end{bmatrix} \quad (5)$$

In the case that there is no light incident on the right hand side of the structure in Fig. 1 or $B_t = 0$ and the environment around this structure is air. From Eq. (5) the transmission coefficient (t) of the structure in Fig. 1 is given by

$$t = \frac{1}{M_{11}} \quad (6)$$

Finally, the transmittance of the MD-PBG structure with defect layer in Fig. 1 is given by

$$T = |t|^2 = \frac{1}{|M_{11}|^2} \quad (7)$$

Note: We can find the M_{11} value by the computer code with MATLAB® programming.

3. SIMULATION RESULTS AND DISCUSSIONS

The TMM technique has been used to make computer codes for reflection and transmission spectrums calculation. The computer program, was written by Prof. J. W. Haus from University of Dayton [7]. First, as shown in Fig.2, we obtain the reflectance of the MD-PBG structure on the left (red line) and the right (blue line) of defect layer and the transmittance of overall structure in Fig.1 as shown in Fig.3 with Eq. (7) when the incident medium and substrate are air and Fig.4 showed that the defect mode, which made from photon localization, have very narrow bandwidth about 20 nm.

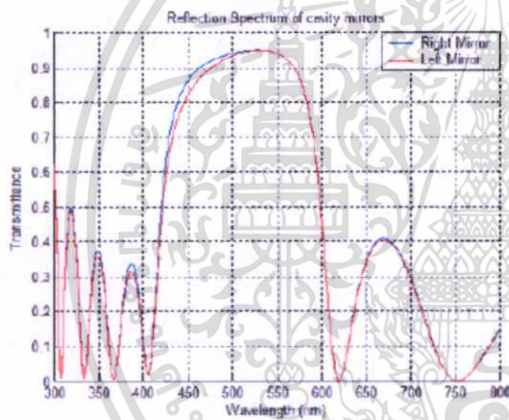


FIGURE 2. The reflectance of the right and the left side MD-PBG structure of middle or defect layer.

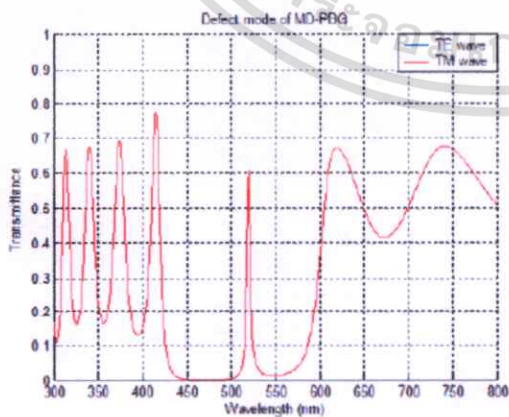


FIGURE 3. Transmission spectrum with defect mode inside photonic band gap.

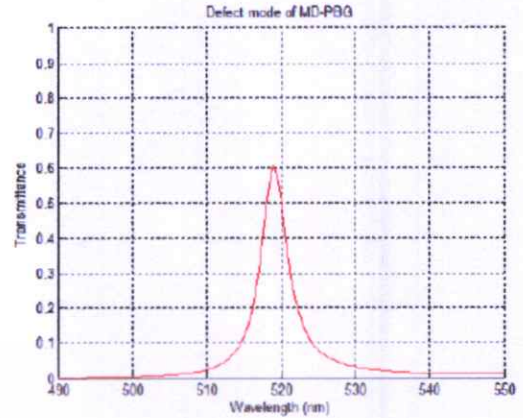


FIGURE 4. Defect mode from photon localization in MD-PBG structure with defect layer.

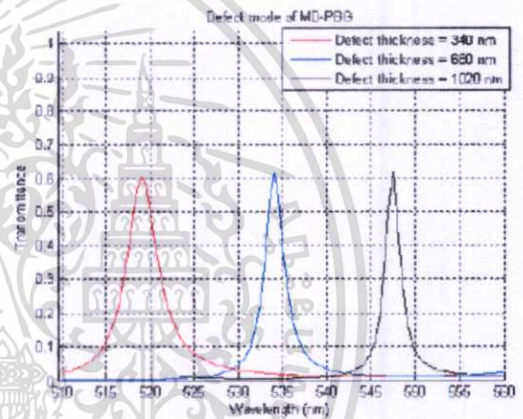


FIGURE 5. Defect mode variation when the defect layer thickness is increased.

The simulation result in Fig.3 and 4 occurs because the optical thickness of one periodic is $\lambda/2$. Then the mode with wavelengths close to λ_0 (for this study it value is about 519 nm) inside the defect layer will be subjected to a strong Bragg reflection (maximum reflection) on both side defect and the photon localization is found from multiple scattering and constructive interference of this mode.

Finally, the thickness of defect layers were changed to $d_{D1} = 2d_H$, $d_{D2} = 4d_H$ and $d_{D3} = 6d_H$. The defect mode is shifted from initial position (from left to right as shown in Fig.4) and shifted toward the long wavelength or low frequency.

From above results, the defect state of MD-PBG structure may be used as the structure of DBR semiconductor laser. In DBR laser, by using corrugated structure or grating instead of the cavity facets form by cleaving for the optical feedback, spectral emission of higher modal purity can be generated. In MD-PBG structure with defect layer, parts of the structure on the left and right of the defect layer with highly

reflectance (about 0.95) are used as DBR reflector and defect layer is used as laser cavity. Due to the highest reflectance, the wavelength of the laser output is about 519 nm. In addition, by changing the defect layer thickness, this structure can be used to tune the laser output wavelength as well.

4. CONCLUSION

From the computational results, since the generation of defect mode from photon localization from this structure is similar to the laser output generating from DBR laser structure, the defect state of MD-PBG structure may be used as a DBR semiconductor laser structure. Two periodic MD-PBG structure on the left and right of defect layer, which have highly reflectance, operate as two DBR reflectors in DBR laser structure. In addition, the output wavelength of MD-PBG structure can be changed by increasing or decreasing defect layer thickness.

ACKNOWLEDGMENTS

The work has been financially supported by Office of the Higher Education Commission scholarship and academically supported by Prof. J. W. Huas of Electro-Optics program, University of Dayton, U.S.A. for his TMM algorithm computer code.

1. J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J. N. Winn and R. D. Meade, *Photonic Crystals: Molding the flow of light* 2nd Ed, Princeton University Press, USA, 2008
2. M. Scalora, M. J. Bloemer, A. S. Pethel, J. P. Dowling, C. M. Bowden, and A. S. Manka, Transparent, metallo-dielectric, one-dimensional, photonic band-gap structures, *J. App. Phys.* 83 (5) (1998) 2377
3. M. J. Bloemer and M. Scalora, Transmissive properties of Ag/SiO₂ photonic band gaps, *J. App. Phys.* 72 (14) (1998) 1676
4. E. D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids*, Academic Press Inc, USA, 1985
5. P. Yeh, *Optical Waves in Layered Media*, John Wiley & Sons, Singapore, 1991
6. M. Skorobogatiy and J. Yang, *Fundamentals of Photonic Crystal Guiding*, Cambridge University Press, UK, 2009
7. J. W. Haus, Photonic band structures in Quantum Optics of confined systems, M. Ducloy and D. Bloch, Eds., pp. 101-142, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, 1996
8. S. L. Chuang, *Physics of Photonic Devices* 2nd Ed, John Wiley & Sons, 2009

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายสุรวุฒิ วิจารณ์
วัน/เดือน/ปีเกิด	13 กันยายน พ.ศ. 2527
ที่อยู่ปัจจุบัน	36/1 ม.5 ต.วังลึก อ.ศรีสำโรง จ.สุโขทัย 64120
ประวัติการศึกษา	จบการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนศรีสำโรง อ.ศรีสำโรง จ.สุโขทัย (ปีการศึกษา 2534 – 2539) จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสวรรคโลกอนันต์วิทยา อ.สวรรคโลก จ.สุโขทัย (ปีการศึกษา 2540 – 2545) วิทยาศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับสอง) สาขาวิชาฟิสิกส์ ประยุกต์ – เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม คณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร (ปีการศึกษา 2546 – 2549)
ประสบการณ์ทำงาน	วิศวกรฝ่ายเทคนิค บริษัทแอปเปิลไซแอนทิฟิก จำกัด ถ.พหลโยธิน พญาไท กรุงเทพมหานคร (พ.ศ. 2550) ผู้ช่วยวิจัย โครงการพัฒนาเซลล์แสงแดดไทย คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร (พ.ศ. 2550)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้