



การศึกษสมบัติการดูดกลืนของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน
A STUDY OF ABSORPTION PROPERTIES OF PHOTONIC HYPERCRYSTAL USING
TRANSFER MATRIX METHOD

นรีพร เรืองจันทร์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2563

การศึกษสมบัติการดูดกลืนของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

A STUDY OF ABSORPTION PROPERTIES OF PHOTONIC HYPERCRYSTAL USING
TRANSFER MATRIX METHOD



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of MASTER OF SCIENCE
(Physics)

Faculty of Science, Srinakharinwirot University

2020

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาสมบัติการดูดกลืนของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน

ของ

นรีพร เรืองจันทร์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

ที่ปรึกษาหลัก

ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรวุฒิ วิจารณ์)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประธาน บุรณศิริ)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณ พลายพิชิต)

ชื่อเรื่อง	การศึกษาสมบัติการดูดกลืนของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน
ผู้วิจัย	นรีพร เรืองจันทร์
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2563
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรุทธิ วิจารณ์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติการดูดกลืนของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล โดยมีส่วนประกอบของชั้นอวิวดุแบบไฮเพอร์โบลิกและชั้นของวัสดุไดอิเล็กตริก ได้แก่ อินเดียมทินออกไซด์จัดเรียงตัวเป็นคาบอย่างต่อเนื่องในหนึ่งมิติ อวิวดุแบบไฮเพอร์โบลิกเกิดจากการจัดเรียงตัวเป็นคาบในสองมิติของแท่งนาโนทองคำที่ฝังตัวอยู่ในสารไดอิเล็กตริก ได้แก่ อินเดียมทินออกไซด์ การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลโดยใช้ระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอนเป็นเครื่องมือในการคำนวณหาค่าสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโหมดสนามไฟฟ้าตัดขวางในย่านความยาวคลื่นที่ตามองเห็นและรังสีอินฟราเรดคลื่นใกล้ จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลสามารถดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความยาวคลื่น 500 ถึง 1,000 นาโนเมตร ของคลื่นในโหมดสนามไฟฟ้าตัดขวาง ช่วงความยาวคลื่นของสเปกตรัมการดูดกลืนมีช่วงที่กว้างขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาของชั้นไดอิเล็กตริก จำนวนคาบ เพอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะในโครงสร้าง และมุมตกกระทบ พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและเกิดการเลื่อนของสเปกตรัมไปทางความยาวคลื่นที่น้อยกว่าหรือเรียกว่าเกิดปรากฏการณ์เลื่อนทางน้ำเงิน ดังนั้นจากการศึกษาหลักการทางฟิสิกส์ของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลสามารถนำไปเป็นแนวทางในการพัฒนาเป็นอุปกรณ์ดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน

คำสำคัญ : โฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล, อวิวดุแบบไฮเพอร์โบลิก, ระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน

Title	A STUDY OF ABSORPTION PROPERTIES OF PHOTONIC HYPERCRYSTAL USING TRANSFER MATRIX METHOD
Author	NAREEPHORN REANGCHAN
Degree	MASTER OF SCIENCE
Academic Year	2020
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Surawut Wicharn

In this study, the absorption properties of photonic hypercrystal structure (PHCs) were studied, numerically inspected and designed beyond those naturally available and composed of a periodically hyperbolic metamaterial layer and dielectric material layer in one dimension. In the first layer, the PHCs are hyperbolic metamaterial structures (HMMs), which are made up of a two-dimensional square lattice preparation of a gold (Au) nanowire embedded in an indium tin oxide (ITO: $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$) host and the second layer was composed of the same dielectric material used in metamaterial layer systematic. First, the PHCs array was designed in the case of a high extinction coefficient in visible light to the near-infrared region. Then, the numerical absorption spectrum of the PHCs was used as the transfer-matrix method for TE and TM-polarized wave. The numerical results showed that calculating the PHCs provided the widest wavelength absorption spectrum in the range of 500-1,000 nm for TE-polarized wave. The absorbance increased with a greater incident angle. Conversely, the level of absorption spectrum of PHCs can be improved by increasing the periodic number and the thickness of the indium tin oxide layer. Finally, the fill factor of HMMs will make the shifting of the absorption spectrum into short-wavelength or blue-shift, when it is increased. Due to the overhead parameters on the absorption spectrum for TE-polarized wave, so the PHCs may be used as the TE-polarized broadband large absorber for energy harvesting and photovoltaic application.

Keyword : Photonic hypercrystal, Hyperbolic metamaterial, Transfer-matrix method

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสามารถช่วยเหลือ และความเอาใจใส่อย่างดี ยิ่งตลอดจนการให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการปรับแก้ไขข้อบกพร่อง จากคณะกรรมการผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรวุฒิ วิจารณ์ ที่ได้ให้ความเมตตากรุณาเป็นที่ปรึกษาและให้ความช่วยเหลือชี้แนะแนวทางในสิ่งที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและการทำปริญญานิพนธ์นี้ด้วยความเอาใจใส่ตลอดมา

รวมทั้ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประธาน บุรณศิริ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณ พลายพิชิต ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพิ่มเติมแก่ผู้วิจัย ทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์และคณะกรรมการบริหารหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒทุกท่าน ที่ได้กรุณาประสิทธิ์ประสาทความรู้ต่าง ๆ ให้แก่ผู้วิจัย ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒที่ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ เพื่อนร่วมงาน ที่บัณฑิตวิทยาลัยสำหรับข้อมูลตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ รวมถึงความช่วยเหลือและกำลังใจให้กับผู้วิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณพี่ ๆ และเพื่อน ๆ สาขาวิชาฟิสิกส์ รวมถึงบุคคลอีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวชื่อนามไว้ ณ ที่นี้ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอโน้มรำลึกถึงคุณของบิดามารดาและครูอาจารย์ ที่อบรมสั่งสอนให้ความรู้เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา

นรีพร เรืองจันทร์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง	1
1. สมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอภิวัดดู	3
1.1 อภิวัดดู (metamaterial)	3
1.2 การกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (dispersion)	4
2. อภิวัดดูแบบไฮเพอร์โบลิก (hyperbolic metamaterials)	7
2.1 นิยามและสมบัติของอภิวัดดูแบบไฮเพอร์โบลิก	7
2.2 โครงสร้างอภิวัดดูแบบไฮเพอร์โบลิก	9
3. การจำลองโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล	10
ความมุ่งหมายของงานวิจัย.....	11
ความสำคัญของการวิจัย	11
ขอบเขตของการวิจัย	11
ประโยชน์ที่ได้รับของงานวิจัย	11
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	12
รายชื่อสัญลักษณ์	12

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
1. การสะท้อนและส่งผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อตัวกลาง	16
1.1 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าตัดขวาง (transverse electromagnetic: TEM).....	17
1.2 สนามไฟฟ้าตัดขวาง (transverse electric: TE).....	17
1.3 สนามแม่เหล็กตัดขวาง (transverse magnetic: TM)	18
2. วิธีการระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน (transfer matrix method) สำหรับโครงสร้างโฟโตนิก ไฮเพอร์คริสตัล	20
2.1 กระบวนการของระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน	20
2.2 ค่าการสะท้อน ส่งผ่าน และดูดกลืนสำหรับโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล	23
3. ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุแต่ละชนิด.....	24
3.1 วัสดุชนิดโลหะ.....	25
3.2 วัสดุชนิดไดอิเล็กตริก.....	27
4. ทฤษฎีตัวกลางประสิทธิผล (effective medium theory)	27
4.1 ทฤษฎีตัวกลางประสิทธิผลสำหรับตัวกลางระบบวางซ้อนกันเป็นชั้น ๆ (multilayer system).....	28
4.2 ทฤษฎีตัวกลางประสิทธิผลสำหรับตัวกลางระบบแท่งนาโน (nanowire system)	29
5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวกลางโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล	34
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	39
1. การออกแบบโครงสร้างของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลที่จะศึกษา.....	39
2. การออกแบบและพัฒนาโปรแกรมคำนวณด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน	41
3. ขั้นตอนการศึกษาผลการคำนวณของโปรแกรมสำหรับงานวิจัยนี้.....	43
4. ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการดูดกลืนของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล	45
4.1 ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อจำนวนคาบ $N = 1$ และค่าเปอร์เซ็นต์ความ เป็นโลหะมีค่าแตกต่างกัน คือ 0.35, 0.55 และ 0.75.....	46

4.2	ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อจำนวนคาบของโครงสร้างมีค่าต่าง ๆ	47
4.3	ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อเปอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะมีค่าต่าง ๆ	47
4.4	ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อมุมตกกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าต่าง ๆ	48
4.5	ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อความหนาของชั้นอินเดียมทินออกไซด์มีค่าต่าง ๆ	48
4.6	ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อวัสดุของฐานรองเป็นวัสดุต่าง ๆ (อากาศ และ ทองคำ)	48
4.7	ขั้นตอนการศึกษาสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ในโครงสร้างผลึกโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล	49
บทที่ 4	ผลการดำเนินงานวิจัย	50
1.	ผลลัพธ์ของการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อจำนวนคาบ $N = 1$ และค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะมีค่าแตกต่างกัน คือ 0.35, 0.55 และ 0.75	51
2.	ผลลัพธ์ของการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อจำนวนคาบของโครงสร้างมีค่าแตกต่างกัน	52
3.	ผลลัพธ์ของการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อเปอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะมีค่าแตกต่างกัน	53
4.	ผลลัพธ์ของการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อมุมตกกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าแตกต่างกัน	54
5.	ผลลัพธ์ของการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อความหนาของชั้นอินเดียมทินออกไซด์มีค่าแตกต่างกัน	55
6.	ผลลัพธ์ของการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อวัสดุของฐานรองเป็นอากาศ ($n_{air} = 1.00$) เทียบกับทองคำ ($n_{Au} = 0.13$)	56
(6.1)	วัสดุฐานรองอากาศเทียบกับทองคำที่จำนวนคาบมีค่าแตกต่างกัน	56
(6.2)	วัสดุฐานรองอากาศเทียบกับทองคำที่เปอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะในโครงสร้างมีค่าแตกต่างกัน	56
(6.3)	วัสดุฐานรองอากาศเทียบกับทองคำที่มุมตกกระทบมีค่าแตกต่างกัน	57

(6.4) วัสดุฐานรองอากาศเทียบกับทองคำที่ความหนาของชั้นอินเดียมทินออกไซด์มีค่าแตกต่างกัน	57
7. ผลลัพธ์ของการศึกษาสนามไฟฟ้าสัมผัสในโครงสร้างผลึกโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล	59
(7.1) สนามไฟฟ้าสัมผัสในโครงสร้างผลึก PHC ที่ N = 5 (Substrate: Air)	59
(7.2) สนามไฟฟ้าสัมผัสในโครงสร้างผลึก PHC ที่ N = 50 (Substrate: Air)	59
(7.3) สนามไฟฟ้าสัมผัสในโครงสร้างผลึก PHC ที่ N = 90 (Substrate: Air)	60
(7.4) สนามไฟฟ้าสัมผัสในโครงสร้างผลึก PHC ที่ N = 5 (Substrate: Au)	60
(7.5) สนามไฟฟ้าสัมผัสในโครงสร้างผลึก PHC ที่ N = 50 (Substrate: Au)	61
(7.6) สนามไฟฟ้าสัมผัสในโครงสร้างผลึก PHC ที่ N = 90 (Substrate: Au)	61
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	64
1. สรุปผลการวิจัย	64
2. อภิปรายผลการวิจัย	65
3. ข้อเสนอแนะ	66
บรรณานุกรม	67
ประวัติผู้เขียน	70

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 แสดงค่าดรรชนีหักเหเชิงซ้อนของโลหะชนิดต่าง ๆ	26
ตาราง 2 ตารางแสดงค่าดรรชนีหักเหเชิงซ้อนของไดอิเล็กตริกชนิดต่างๆ.....	27
ตาราง 3 แสดงพารามิเตอร์ความหนาของอภิวัดแบบไฮเพอร์โบลิก (I_1) และชั้นอินเดียมทินออกไซด์ (I_2) ของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล	43
ตาราง 4 แสดงพารามิเตอร์สัดส่วนของเปอร์เซ็นต์ปริมาตรความเป็นโลหะในไดอิเล็กตริก (f) ของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล	44
ตาราง 5 แสดงพารามิเตอร์จำนวนคาบของโครงสร้างมีค่าต่าง ๆ (N) ของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล	44
ตาราง 6 แสดงพารามิเตอร์มุมตกกระทบของแสง (θ) ของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล	45

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 แสดงพารามิเตอร์ลักษณะเฉพาะทางค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและความซาบซึ่มได้ทางแม่เหล็กของวัสดุชนิดต่าง ๆ	4
ภาพประกอบ 2 แสดงการหักเหของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวกลางที่มีค่าดรรชนีหักเหแสงแตกต่างกัน (a) $n > 1$ (b) $n \gg 1$ และ (c) $n < 0$	5
ภาพประกอบ 3 แสดงดรรชนีหักเหผ่านตัวกลาง (a) ดรรชนีหักเหของมีค่าเป็นบวก (b) ดรรชนีหักเหของมีค่าเป็นลบ	6
ภาพประกอบ 4 แสดงพื้นผิวที่ความถี่เดียวกันในระบบ 3 มิติของตัวกลาง (a) ไอโซโทรปิก (b) ไฮเพอร์โบลิกของไดอิเล็กตริก และ (c) ไฮเพอร์โบลิกของโลหะ	9
ภาพประกอบ 5 แสดงการจำลองโครงสร้างของอภิวัดแบบไฮเพอร์โบลิกแบบ (a) multilayer array (b) nanowire array	10
ภาพประกอบ 6 แสดงโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล	11
ภาพประกอบ 7 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นผ่านตัวกลางสองชนิด (a) ทิศของการโพลาไรซ์แบบ TE และ (b) ทิศของการโพลาไรซ์แบบ TM	20
ภาพประกอบ 8 แสดงการเปลี่ยนแปลงของดรรชนีหักเหตามแนวแกน $\hat{z}$ ของโครงสร้าง	23
ภาพประกอบ 9 แสดงโครงสร้างอภิวัดแบบไฮเพอร์โบลิก (a) แบบฟิล์มบางวางซ้อนทับกัน และ (b) แบบแท่งนาโน	35
ภาพประกอบ 10 แสดงโครงสร้างอภิวัดแบบไฮเพอร์โบลิก (a) แบบวางซ้อนกันเป็นชั้น ๆ (b) แบบแท่งโลหะนาโน	36
ภาพประกอบ 11 แสดงโครงสร้างของวัสดุโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลชั้น 1 คืออภิวัดแบบไฮเพอร์โบลิก และชั้นที่ 2 คือไดอิเล็กตริก	37
ภาพประกอบ 12 แสดงโครงสร้างของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลชั้น A คืออภิวัดแบบไฮเพอร์โบลิก และชั้น B คือไดอิเล็กตริก	37
ภาพประกอบ 13 แสดงโครงสร้างอภิวัดแบบวางตัวเรียงซ้อนทับกันเป็นชั้น ๆ	38

ภาพประกอบ 14 แสดงแบบจำลองของอวัยวะแบบไฮเพอร์โบลิค.....	39
ภาพประกอบ 15 แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการตรวจสอบสมบัติของ โครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล	40
ภาพประกอบ 16 แสดงแบบจำลองของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลมีการจัดเรียงตัวแบบเป็นคาบของ อวัยวะแบบไฮเพอร์โบลิคในชั้นที่ 1 และวัสดุอินเดียมทินออกไซด์ในชั้นที่ 2	41
ภาพประกอบ 17 แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับระเบียบวิธีเมทริกซ์ ถ่ายโอน.....	42
ภาพประกอบ 18 แสดงแบบจำลองของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลเรียงต่อกันเป็นคาบหลายชั้น	46
ภาพประกอบ 19 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์ คริสตัล	46
ภาพประกอบ 20 ผลลัพธ์ของการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อจำนวนคาบ $N = 1$ และค่า เปอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะมีค่าแตกต่างกัน คือ 0.35, 0.55 และ 0.75	51
ภาพประกอบ 21 ผลลัพธ์ของการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อจำนวนคาบของโครงสร้างมีค่า แตกต่างกัน.....	52
ภาพประกอบ 22 ผลลัพธ์ของการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อเปอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะมีค่า แตกต่างกัน.....	53
ภาพประกอบ 23 ผลลัพธ์ของการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อมุมตกกระทบของคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าแตกต่างกัน	54
ภาพประกอบ 24 ผลลัพธ์ของการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อความหนาของชั้นอินเดียมทิน ออกไซด์มีค่าแตกต่างกัน.....	55
ภาพประกอบ 25 ผลลัพธ์ของสเปกตรัมการดูดกลืนเมื่อจำนวนคาบต่างกันของวัสดุฐานรอง (a) อากาศ และ (b) ทองคำ	56
ภาพประกอบ 26 ผลลัพธ์ของสเปกตรัมการดูดกลืนเมื่อเปอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะต่างกันของวัสดุ ฐานรอง (a) อากาศ และ (b) ทองคำ	56
ภาพประกอบ 27 ผลลัพธ์ของสเปกตรัมการดูดกลืนเมื่อมุมตกกระทบของคลื่นต่างกันของวัสดุ ฐานรอง (a) อากาศ และ (b) ทองคำ	57

ภาพประกอบ 28 ผลลัพธ์ของสเปกตรัมการดูดกลืนเมื่อความหนาของชั้นอินเดียมทินออกไซด์ ต่างกันของวัสดุฐานรอง (a) อากาศ และ (b) ทองคำ	57
ภาพประกอบ 29 (a) ผลลัพธ์ของสเปกตรัมการดูดกลืนที่จำนวนคาบเท่ากับ 5 และ (b) กราฟ สนามไฟฟ้าภายในโครงสร้าง PHC ที่จำนวนคาบเท่ากับ 5 ของวัสดุฐานรองอากาศ.....	59
ภาพประกอบ 30 (a) ผลลัพธ์ของสเปกตรัมการดูดกลืนที่จำนวนคาบเท่ากับ 50 และ (b) กราฟ สนามไฟฟ้าภายในโครงสร้าง PHC ที่จำนวนคาบเท่ากับ 50 ของวัสดุฐานรองอากาศ.....	59
ภาพประกอบ 31 (a) ผลลัพธ์ของสเปกตรัมการดูดกลืนที่จำนวนคาบเท่ากับ 90 และ (b) กราฟ สนามไฟฟ้าภายในโครงสร้าง PHC ที่จำนวนคาบเท่ากับ 90 ของวัสดุฐานรองอากาศ.....	60
ภาพประกอบ 32 (a) ผลลัพธ์ของสเปกตรัมการดูดกลืนที่จำนวนคาบเท่ากับ 5 และ (b) กราฟ สนามไฟฟ้าภายในโครงสร้าง PHC ที่จำนวนคาบเท่ากับ 5 ของวัสดุฐานรองทองคำ.....	60
ภาพประกอบ 33 (a) ผลลัพธ์ของสเปกตรัมการดูดกลืนที่จำนวนคาบเท่ากับ 50 และ (b) กราฟ สนามไฟฟ้าภายในโครงสร้าง PHC ที่จำนวนคาบเท่ากับ 50 ของวัสดุฐานรองทองคำ.....	61
ภาพประกอบ 34 ผลลัพธ์ของสเปกตรัมการดูดกลืนที่จำนวนคาบเท่ากับ 90 และ (b) กราฟ สนามไฟฟ้าภายในโครงสร้าง PHC ที่จำนวนคาบเท่ากับ 90 ของวัสดุฐานรองทองคำ.....	61

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

นับตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันนี้ ตลอดเวลาที่ผ่านมาโลกของเรามีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากด้านการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยี และนวัตกรรมสิ่งประดิษฐ์ใหม่ ๆ ที่ทันสมัยและคุณภาพสูงมีมาอย่างต่อเนื่อง ในงานวิจัยนี้เราจึงมุ่งเห็นถึงการพัฒนาของวัสดุในระดับนาโนที่มีสมบัติพิเศษไม่พบทั่วไปในธรรมชาติ เพื่อเป็นแนวทางและเกิดประโยชน์ต่อการพัฒนาทางด้านสมบัติเชิงแสงของวัสดุที่เหมาะสมกับความต้องการนำไปใช้ประโยชน์ วัสดุที่มีสมบัติพิเศษนี้เรียกว่า อภิวัสดุ (metamaterials) คือ วัสดุที่มีสมบัติขึ้นกับสภาพยอมทางไฟฟ้าและความซาบซึมทางแม่เหล็กในการออกแบบโครงสร้าง สมบัติดังกล่าวคือ สภาพยอมทางไฟฟ้าหรือความซาบซึมได้ทางแม่เหล็กมีค่าเป็นลบ ส่งผลต่อกลไกการหักเหของแสงมีค่าเป็นลบด้วย

การนำเสนอและประดิษฐ์เกี่ยวกับอภิวัสดุจึงมีตั้งแต่นั้นมา โดยวัสดุชนิดนี้จะมีลักษณะของคุณสมบัติที่พิเศษไม่พบทั่วไปในธรรมชาติ สมบัติดังกล่าวคือมีคุณสมบัติขึ้นกับค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า และค่าความซาบซึมได้ทางแม่เหล็กที่เป็นลบทั้งคู่ และส่งผลให้ดัชนีหักเหของแสงมีค่าเป็นลบด้วย ทำให้แนวการหักเหของลำแสงแตกต่างไปจากแนวปกติ ต่อมา Ferrari, Wu, Lepage, Zhang, and Liu (2015) ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับ อภิวัสดุแบบไฮเพอร์โบลิก (hyperbolic metamaterials: HMMs) ซึ่งได้มีบทบาทเป็นอย่างมากในเรื่องของนาโนโฟโตนิก (nanophotonic) เนื่องจากเป็นความสามารถที่ไม่เคยมีมาก่อนและการเปลี่ยนแปลงทางสนามไฟฟ้าจากการกระจายของแสง คุณลักษณะแบบนี้เกิดมาจากการกระตุ้นภายในของ HMMs จากการเข้าสู่ของพื้นผิวพลาสมอน (surface plasmons: SPs) ซึ่งพื้นผิวพลาสมอน (Ferrari et al., 2015) คือการสั่นของอิเล็กตรอนที่สะสมถูกกักขังอยู่ตรงพื้นผิวโลหะในการสัมผัสกับไดอิเล็กตริก ถ้าโลหะและไดอิเล็กตริกมีรูปร่างเป็นชั้นบาง ๆ ที่ซ้อนทับรวมกัน และพื้นผิวโลหะจะรองรับการแพร่กระจายบนพื้นผิวพลาสมอน (propagating surface plasmons or surface plasmon polaritons: SPPs) ถ้าโลหะมีรูปร่างของอนุภาคระดับนาโน (nanoparticle) หรือเส้นลวดระดับนาโน (nanowire) พื้นผิวของโลหะจะรองรับการจำกัดวงพื้นผิวพลาสมอน (localized surface plasmon) การกระตุ้นจากการสั่นทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า หลังจากเกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็วของทั้งด้านไดอิเล็กตริกและโลหะ และโดยมากจะมีปฏิสัมพันธ์จากการซ้อนทับกันของสนามที่อยู่ใกล้กัน

การนำวัสดุประเภทอภิวัดมาใช้ประโยชน์ ยกตัวอย่างเช่น เลนส์สมบรูณ์แบบ อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น เลนส์สมบรูณ์แบบหรือ perfect lens (Ferrari et al., 2015) มีหลักการทำงานคือเลนส์ชนิดนี้สามารถสร้างภาพของวัตถุที่มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นของแสงที่ใช้ถ่ายภาพมาก ๆ ได้โดยอาศัยการหักเหของแสงเชิงลบ จึงทำให้เป็นอุปกรณ์ของกล้องถ่ายภาพด้วยแสงที่มีความละเอียดสูงมาก สามารถถ่ายภาพของวัตถุที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรได้ ซึ่งจะเป็นคุณสมบัติพิเศษที่ไม่มีในเลนส์ธรรมดาทั่วไปที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นบวกสำหรับ (AlShareef & Ramahi, 2013) อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน (energy harvesting) ซึ่งการเก็บเกี่ยวพลังงานเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากรอบตัวมาทำให้เกิดประโยชน์ เช่น สายอากาศ (rectenna) การส่งผ่านกำลังแบบไร้สาย (wireless power) และเซลล์แสงอาทิตย์ (solar cells) เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างขึ้นโดยใช้หลักการการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากดวงอาทิตย์ (Du, Kam, Demir, Yu, & Sun, 2011) วัสดุที่ใช้สร้างอุปกรณ์ประกอบด้วยสารไดอิเล็กตริกที่สามารถดูดกลืนแสงในย่านที่ต้องการ จึงเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานจากแสงของดวงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า ถูกสร้างขึ้นครั้งแรกในปีค.ศ. 1954 โดยแชปปีน (Chapin) ฟูลเลอร์ (Fuller) และเพียร์สัน (Pearson)

จากการศึกษาและการทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับแนวคิดทางทฤษฎีและเชิงการทดลองที่เป็นที่ยอมรับและรวบรวมเอาความรู้ทางด้านของอภิวัดแบบไฮเพอร์โบลิก (hyperbolic metamaterials) เข้าด้วยกันทำให้สามารถนำมาศึกษาต่อได้ การออกแบบโครงสร้างสามารถทำได้สำเร็จโดยสร้างตัวกลางไฮเพอร์โบลิกที่สร้างมาจากวัสดุชนิดโลหะหรือไดอิเล็กตริก หรือตัวกลางอื่น ๆ จะมีเทนเซอร์ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกันไปในการออกแบบองค์ประกอบของโครงสร้าง ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษา วิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างของวัสดุประเภทโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลที่มีการจัดเรียงตัวแบบแท่งนาโน (nanowire array) ให้มีคุณสมบัติในการดูดกลืนสูง โดยใช้วิธีการระเหยวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน (transfer matrix method) และโดยใช้โปรแกรมแมทเลป (MATLAB) จะทำงานในย่านความถี่ของแสงที่ครอบคลุมในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet) แสงที่ตามองเห็น (visible) รังสีอินฟราเรดคลื่นใกล้ (near-infrared) และรังสีอินฟราเรดคลื่นกลาง (mid-infrared)

1. สมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอภิวัด

สมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุประเภทอภิวัดมีค่าขึ้นอยู่กับค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (electric permittivity: ϵ) ค่าความซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก (magnetic permeability: μ) และค่าดัชนีหักเหของแสง (refractive index: n)

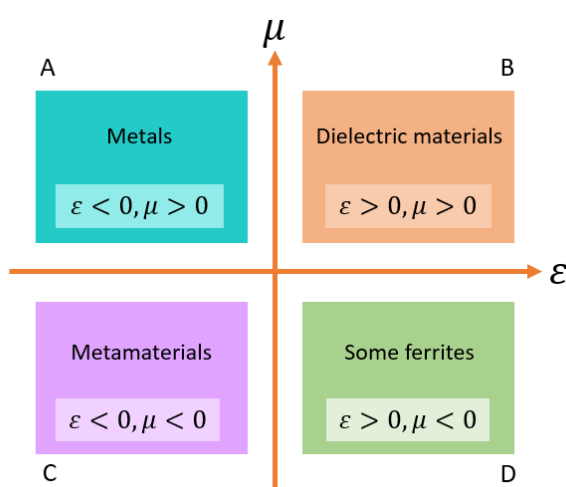
1.1 อภิวัด (metamaterial)

แนวคิดเกี่ยวกับความเป็นไปได้ของวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษเริ่มต้นขึ้นในปี ค.ศ. 1968 ถูกค้นพบโดยนักฟิสิกส์ชาวรัสเซียชื่อว่า วิคเตอร์ เวเซลากอ (Victor Veselago) ได้จินตนาการถึงตัวกลางที่มีดัชนีหักเหแสงมีค่าติดลบ โดยได้ตั้งข้อสันนิษฐานว่าตัวกลางจะต้องขึ้นอยู่กับสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแม่เหล็ก คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (electric permittivity: ϵ) และค่าความซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก (magnetic permeability: μ) ซึ่งค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลางใด ๆ เป็นรากที่สองของผลคูณระหว่างค่าคงที่ของสภาพยอมทางไฟฟ้า และความซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก ดังภาพประกอบ 1

ต่อมาในปี ค.ศ. 2000 นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษชื่อ จอห์น เพนดรี (John Pendry) ได้นำวัสดุที่มีค่าดัชนีหักเหแสงติดลบมาชี้ให้เห็นว่าสามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ โดยการคิดค้นวิธีประดิษฐ์วัสดุที่มีค่าดัชนีหักเหแสงติดลบในเชิงทฤษฎีเป็นคนแรก ใช้ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแสงที่ประกอบด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ในการอธิบายการเคลื่อนที่ของแสงภายในวัสดุที่มีดัชนีหักเหติดลบ และต่อมาอีกไม่นานก็มีนักฟิสิกส์คนอื่น ๆ นำไปประดิษฐ์และทดลองให้เห็นจริง จอห์น เพนดรี ได้ข้อสรุปเกี่ยวกับอภิวัดว่าจะประพาดตัวเสมือนเลนส์สมบูรณ์แบบ (perfect lens) คือ เลนส์สมบูรณ์แบบสามารถสร้างภาพของวัตถุที่มีขนาดเล็กมากกว่าความยาวคลื่นของแสงที่ใช้ในการถ่ายภาพ โดยอาศัยหลักการของการหักเหแสงเชิงลบ กล้องถ่ายภาพด้วยแสงที่เกิดจากเลนส์สมบูรณ์แบบจะมีความละเอียดสูง สามารถถ่ายภาพวัตถุที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรได้ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ไม่มีในเลนส์ธรรมดาทั่ว ๆ ไป เลนส์ธรรมดาทั่วไปจะมีค่าดัชนีหักเหแสงเป็นบวก

อภิวัด (Noginov & Podolskiy, 2011) เป็นวัสดุประดิษฐ์เชิงวิศวกรรมทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีสมบัติไม่พบทั่วไปในธรรมชาติ นั่นคือมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซาบซึมได้ทางแม่เหล็กมีค่าเป็นลบทั้งคู่ ส่งผลให้ดัชนีหักเหของแสงมีค่าเป็นลบ โดยในวัสดุทั่วไปในธรรมชาติจะมีค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นบวก โดยเมตะแมททีเรียลประกอบขึ้นมาจากวัสดุในส่วนที่เป็นโลหะและสารไดอิเล็กตริก เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าจากภายนอกจะทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนได้ดี เพราะโลหะเป็นสารตัวนำไฟฟ้าซึ่งไม่มีช่องว่างพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์กับแถบการนำ สำหรับส่วนประกอบที่เป็นสารไดอิเล็กตริกซึ่งไม่มีประจุอิสระที่สามารถเคลื่อนที่ได้ใน

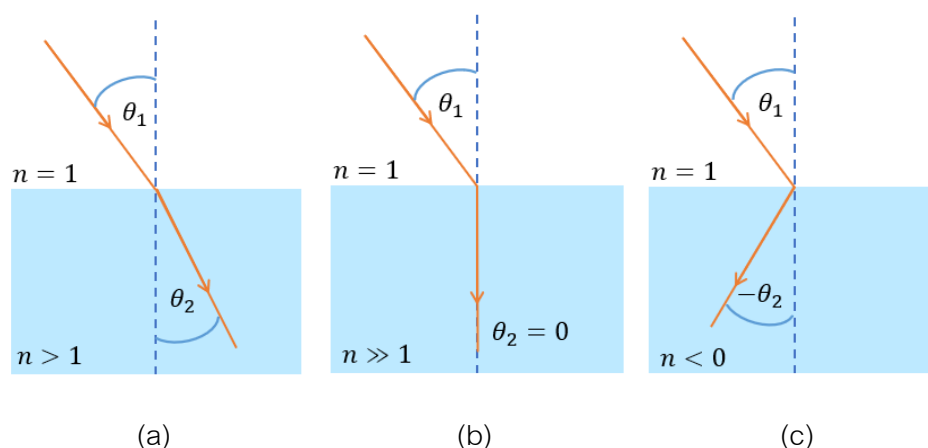
เนื้อสาร เพื่อทำให้เกิดการกระแสนี้ยว่นำขึ้น ประจุทั้งหมดจะถูกกักอยู่ภายในโมเลกุลหรือโครงผลึกของโมเลกุลด้วยแรงของคูลอมบ์ เมื่อมีการใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในเนื้อสารจะมีผลเพียงทำให้ประจุเหล่านั้นเคลื่อนหรือบิดตัวเพียงเล็กน้อย แต่ไม่เคลื่อนออกจากตำแหน่งที่อยู่ประจำนำไปสู่ค่าความยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ (relative permeability) หรือเรียกว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant) จะเกิดการแยกออกเป็นสองขั้วหรือโพลาริเซชันของตัวกลางนั้น จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้า



ภาพประกอบ 1 แสดงพารามิเตอร์ลักษณะเฉพาะทางค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและความซาบซึมได้ทางแม่เหล็กของวัสดุชนิดต่าง ๆ

1.2 การกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (dispersion)

การกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง (Shekhar, Atkinson, & Jacob, 2014) ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงแสงของตัวกลาง คือ สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดการสะท้อน (reflection) การหักเห (refraction) และการดูดกลืน (absorption) ขึ้นภายในโครงสร้าง ในแต่ละโครงสร้างจะมีสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันไปตามค่าดัชนีหักเหของวัสดุ (refractive index, n) ดังภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 แสดงการหักเหของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหแสงแตกต่างกัน (a) $n > 1$ (b) $n \gg 1$ และ (c) $n < 0$

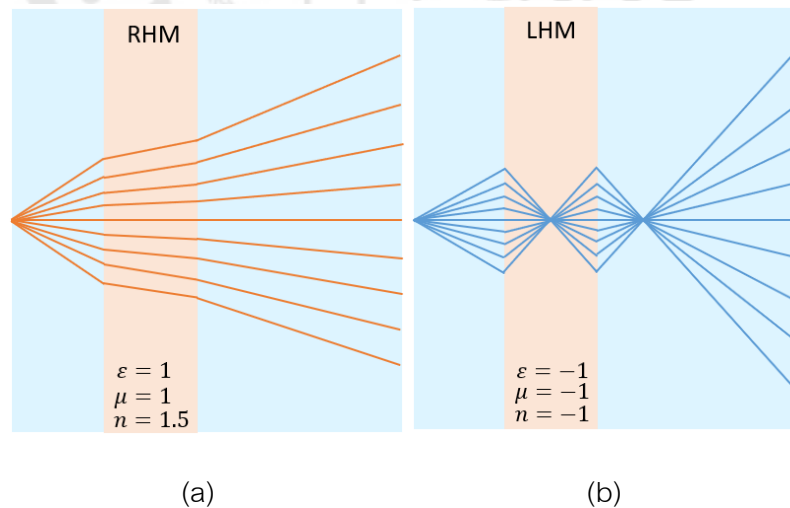
ตัวอย่างแสดงดัชนีหักเหของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศหรืออากาศเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีค่าน้อยที่สุดคือ $n = 1$ ส่วนตัวกลางในธรรมชาติอื่น ๆ ที่ไม่ใช่อากาศจะมีค่าดัชนีหักเหมากกว่าหนึ่งเสมอ ภาพประกอบ 2(a) เป็นแผนภาพแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบลงบนพื้นผิวของตัวกลางระหว่างอากาศ ($n = 1$) และตัวกลางอื่น ๆ ที่มีดัชนีหักเหมากกว่าหนึ่ง ($n > 1$) ตัวอย่างเช่น น้ำ แก้ว โดยมีมุมตกกระทบเป็นมุม θ_1 และเกิดการเบี่ยงเบนของลำคลื่นแสงออกจากแนวเส้นทางเดิมเป็นมุมหักเห θ_2 เมื่อค่าดัชนีหักเหของตัวกลางมีค่าเพิ่มมากขึ้น จะทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของลำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกจากแนวเส้นทางเดิมมากขึ้น ในภาพประกอบ 2(b) เป็นการแสดงถึงเมื่อสมมติให้ค่าของดัชนีหักเหมีค่ามากกว่า 1 มาก ๆ ($n \gg 1$) เส้นลำคลื่นแสงหักเหจะตั้งฉากพอดีกับตัวกลางทั้งสองและมีมุมหักเหมีค่าเท่ากับศูนย์ ภาพประกอบ 2(c) แสดงถึงมุมหักเหที่มีค่าติดลบ ($n < 0$) พบว่าลำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหักเหสามารถเบนออกจากแนวเส้นทางเดิมไปทางด้านซ้ายเนื่องมาจากตัวกลางมีค่าดัชนีหักเหติดลบ (negative refractive index) (Jakšić, Dalarsson, & Maksimović, 2006) ดรรชนีหักเหเชิงซ้อนของตัวกลางสามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางและความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศ ซึ่งค่าดัชนีหักเหในตัวกลางใด ๆ เป็นรากที่สองของผลคูณระหว่างค่าคงที่ของสภาพยอมทางไฟฟ้า และความซาบซึ่มได้ทางแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$n^2 = \mu\epsilon \quad (1.1)$$

เมื่อ μ คือ ค่าความซาบซึ่มทางแม่เหล็กสัมพัทธ์เชิงซ้อน และ ε คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน ถ้า ε และ μ เป็นลบทั้งคู่ในช่วงความถี่ที่กำหนด อาจจะเขียนได้เป็น $\mu = |\mu|\exp(i\pi)$ และ $\varepsilon = |\varepsilon|\exp(i\pi)$ เป็นดังสมการ

$$\begin{aligned} n &= \sqrt{|\mu||\varepsilon|\exp(2i\pi)} \\ &= \sqrt{|\mu||\varepsilon|}\sqrt{\exp(2i\pi)} \\ &= -\sqrt{|\mu||\varepsilon|} \end{aligned} \quad (1.2)$$

วัสดุที่มีค่าคงที่สภาพยอมทางไฟฟ้าติดลบ (Hoffman et al., 2007) จะเกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นใกล้เคียงกับความยาวคลื่นที่ทำให้อะตอมของวัสดุเกิดการสั่นพ้องเชิงไฟฟ้ากับสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ส่วนความซาบซึ่มได้ทางแม่เหล็กติดลบจะเกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นใกล้เคียงกับความยาวคลื่นที่ทำให้อะตอมเกิดการสั่นพ้องเชิงแม่เหล็กกับสนามแม่เหล็กของแสง การเกิดการสั่นพ้องเชิงไฟฟ้าและการสั่นพ้องเชิงแม่เหล็กจะเกิดขึ้นความยาวคลื่นแสงใกล้เคียงกัน วัสดุที่ประกอบขึ้นจากอะตอมของวัสดุเหล่านี้จะมีค่าดัชนีหักเหติดลบ เมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบที่ตัวกลางปกติในธรรมชาติมีค่าดัชนีหักเหเป็นบวกและตัวกลางสมบัติพิเศษมีค่าดัชนีหักเหติดลบ จะมีการเบี่ยงเบนของลำคลื่นที่แตกต่างกันแสดงดังภาพประกอบ 3(a) และ 3(b) ตามลำดับ



ภาพประกอบ 3 แสดงดัชนีหักเหผ่านตัวกลาง (a) ดรรชนีหักเหของมีค่าเป็นบวก (b) ดรรชนีหักเหของมีค่าเป็นลบ

2. อภิวัดแบบไฮเพอร์โบลิก (hyperbolic metamaterials)

2.1 นิยามและสมบัติของอภิวัดแบบไฮเพอร์โบลิก

แนวคิดสำหรับวัสดุที่มีพฤติกรรมผลึกอภิวัดแบบไฮเพอร์โบลิก (Ferrari et al., 2015) เริ่มต้นมาจากการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางแสงของผลึกในแต่ละตัวกลาง ซึ่งมีส่วนประกอบของความสัมพันธ์เชื่อมต่อกันของการกระจัดทางไฟฟ้า (electric displacement: $\vec{D}$) และการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็ก (magnetic conduction: $\vec{B}$) สามารถนำไปสู่สนามไฟฟ้า $\vec{E}$ และสนามแม่เหล็ก $\vec{H}$ รวมทั้งความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกับเทนเซอร์ของเมทริกซ์สภาพยอมทางไฟฟ้าและความซาบซึ่มทางแม่เหล็กได้ ดังสมการ

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{\epsilon} \vec{E} \quad (1.3)$$

และ
$$\vec{B} = \mu_0 \vec{\mu} \vec{H} \quad (1.4)$$

เมื่อ ϵ_0 คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าในสุญญากาศ (vacuum permittivity)

μ_0 คือ ความซาบซึ่มทางแม่เหล็กในสุญญากาศ (vacuum permeability)

$\vec{\epsilon}$ คือ เทนเซอร์ของเมทริกซ์สภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพันธ์ (relative permittivity tensors)

$\vec{\mu}$ คือ เทนเซอร์ของเมทริกซ์ความซาบซึ่มได้ทางแม่เหล็กสัมพันธ์ (relative permeability tensors)

พิจารณาสมบัติของตัวกลางเฉพาะค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า และโดยไม่ต้องพิจารณาสมบัติความเป็นแม่เหล็ก (nonmagnetic media)

สมมติให้ค่าเทนเซอร์ของสภาพยอมทางไฟฟ้า $\vec{\epsilon}$ เมื่อ diagonalization อยู่ในรูปแบบ

$$\vec{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

ภายใต้กรอบโครงสร้างคาร์ทีเซียน (cartesian frame) ของการกำหนดตำแหน่งตามแกนหลักของผลึก (so-called principal axes) โดย 3 องค์ประกอบทางแนวแยงเป็นบวกทั้งหมด และโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับความถี่เชิงมุม (ω)

องค์ประกอบของโครงสร้างผลึกจะอยู่ในเทอมดังต่อไปนี้

(1) แกนแสงสองแกน (biaxial) เมื่อ $\epsilon_{xx} \neq \epsilon_{yy} \neq \epsilon_{zz}$

(2) แกนแสงแกนเดียว (uniaxial) เมื่อ $\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} \neq \epsilon_{zz}$

(3) คลื่นแสงแพร่กระจายทุกทิศทาง (isotropic) เมื่อ $\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \epsilon_{zz}$

กำหนดความสัมพันธ์ของการแพร่กระจายของแสงในตัวกลาง จะแสดงโดยสมการที่ (1.5)

พิจารณาสมการแมกซ์เวลล์ 2 สมการในกรณีที่ไม่สนใจแหล่งกำเนิดต่อไปนี้

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.6)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.7)$$

เมื่อ $\vec{D}$ และ $\vec{B}$ มีความหมายเหมือนสมการที่ (1.3) และ (1.4) ตามลำดับ โดยแทนคลื่นระนาบลงในสมการที่ (1.6) และ (1.7) คลื่นระนาบที่แสดงคือ $\vec{E} = E_0 e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}$ และ $\vec{H} = H_0 e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}$ เมื่อ $\vec{k}$ คือเวกเตอร์ของคลื่น (wavevector) จะได้

$$\vec{k} \times \vec{E} = \omega \mu_0 \vec{H} \quad (1.8)$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = -\omega \epsilon_0 \vec{E} \quad (1.9)$$

แทนค่าสมการที่ (1.8) ลงในสมการที่ (1.9) จะได้ค่าการแทนของค่าตัวเฉพาะ (eigenvalue) สำหรับสนามไฟฟ้า $\vec{E}$ คือ

$$\vec{k} \times (\vec{k} \times \vec{E}) + \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \vec{E} = 0 \quad (1.10)$$

สามารถพัฒนาให้อยู่ในรูปแบบเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} k_0^2 \epsilon_{xx} - k_y^2 - k_z^2 & k_x k_y & k_x k_z \\ k_x k_y & k_0^2 \epsilon_{yy} - k_x^2 - k_z^2 & k_y k_z \\ k_x k_z & k_y k_z & k_0^2 \epsilon_{zz} - k_x^2 - k_y^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{E}_x \\ \vec{E}_y \\ \vec{E}_z \end{bmatrix} = 0 \quad (1.11)$$

เมื่อ $k_0 = \frac{\omega}{c}$ คือ ขนาดของเวกเตอร์คลื่น (magnitude of wavevector)

$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ คือ ความเร็วของแสงในสุญญากาศ (speed of light in vacuum)

ลำดับต่อมาพิจารณาตัวกลางที่มีแกนแสงแกนเดียว (uniaxial media) โดยกำหนดตำแหน่งแกนแสงไปตามทิศทาง $\hat{z}$

โดยที่สภาพยอมทางไฟฟ้ามีทิศ ดังสมการ

$$\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} \equiv \epsilon_{\perp} \quad (1.12)$$

และ

$$\epsilon_{zz} \equiv \epsilon_{\parallel} \quad (1.13)$$

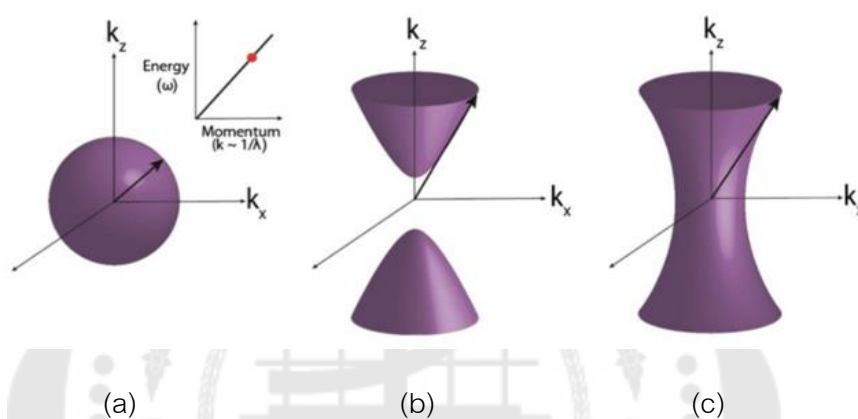
และเวกเตอร์คลื่น ดังสมการ

$$k_{\perp} = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \quad (1.14)$$

จากสมการที่ (1.11) นำไปสู่ความสัมพันธ์ของการกระจายตัว ดังสมการ

$$(k_{\parallel}^2 + k_{\perp}^2 - \epsilon_{\parallel} k_0^2) \left(\frac{k_{\parallel}^2}{\epsilon_{\perp}} + \frac{k_{\perp}^2}{\epsilon_{\parallel}} - k_0^2 \right) = 0 \quad (1.15)$$

เมื่อกำหนดให้เท่ากับศูนย์ของทั้งสองเทอมข้างต้นที่มีความสัมพันธ์ของการกระจายตัวเป็นรูปทรงกลมแสดงดังภาพประกอบ 4(a) และเป็นรูปไฮเพอร์โบลิกแสดงดังภาพประกอบ 4(b) และ 4(c) ซึ่งขึ้นกับชนิดของวัสดุ เนื่องจากแปรผันตามสภาพยอมทางไฟฟ้าในทิศตั้งฉากและทิศขนานกับแกนของแสง บนพื้นผิวที่ความถี่เดียวกันใน k สเปส (k -space) เทอมแรกบอกถึงลักษณะการโพลาไรซ์ของคลื่นในระนาบในทิศ $\hat{x}$ และ $\hat{y}$ (ordinary or TE waves) และเทอมที่สองแสดงถึงการโพลาไรซ์ของคลื่นในระนาบแกนของแสง (extraordinary or TM waves)

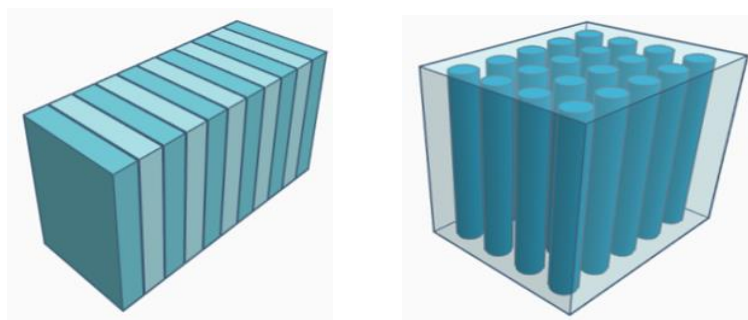


ภาพประกอบ 4 แสดงพื้นผิวที่ความถี่เดียวกันในระบบ 3 มิติของตัวกลาง (a) ไอโซโทรปิก (b) ไฮเพอร์โบลิกของไดอิเล็กตริก และ (c) ไฮเพอร์โบลิกของโลหะ

ที่ ม า : Hyperbolic metamaterials: fundamentals and applications | Nano Convergence | Full Text (springeropen.com)

2.2 โครงสร้างอวิวัสดุแบบไฮเพอร์โบลิก

โครงสร้างอวิวัสดุแบบไฮเพอร์โบลิกมีองค์ประกอบของส่วนที่เป็นโลหะและส่วนที่เป็นสารไดอิเล็กตริกวางซ้อนกันเป็นคาบอย่างต่อเนื่อง ลักษณะแบบจำลองการวางตัวของโครงสร้างอวิวัสดุแบบไฮเพอร์โบลิก ได้แก่ การวางตัวแบบซ้อนทับกันเป็นชั้น ๆ (Lu et al., 2019) และการวางตัวแบบแท่งโลหะนาโนที่ฝังตัวในสารไดอิเล็กตริก (Liu, Bartal, & Zhang, 2008) จะแสดงดังภาพประกอบ 5



(a)

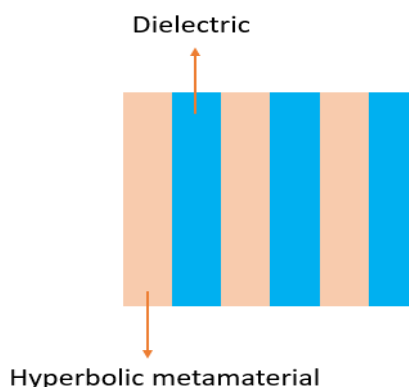
(b)

ภาพประกอบ 5 แสดงการจำลองโครงสร้างของวัสดุแบบไฮเพอร์โบลิกแบบ (a) multilayer array (b) nanowire array

3. การจำลองโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล

โฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล (Narimanov, 2014) เป็นโครงสร้างทางแสงในกลุ่มที่เรียกว่า โฟโตนิกคริสตัลแบบ 1 มิติ (one-dimensional photonic crystals) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เกิดจากการจัดเรียงตัวแบบเป็นคาบในหนึ่งมิติ (one-dimensional periodic arrangement) ของชั้นวัสดุที่มีดรรชนีหักเหและความหนาแตกต่างกัน (John D. Joannopoulos, 2008) ด้วยเหตุนี้สำหรับโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลจึงเกิดจากการจัดเรียงตัวแบบเป็นคาบของชั้นวัสดุแบบไฮเพอร์โบลิกกับชั้นสารไดอิเล็กตริกแสดงดังภาพประกอบ 6

โครงสร้างการจัดเรียงตัวอย่างเป็นคาบอย่างต่อเนื่องของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลส่งผลให้สมบัติทางแสงที่เกิดการเคลื่อนที่และกระจายตัวภายในโครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เช่น สมบัติการสะท้อนหรือดูดกลืนของโครงสร้าง การจำลองโครงสร้างชั้นแรกจะประกอบด้วยโครงสร้างวัสดุแบบวางตัวซ้อนทับกันเป็นชั้น ๆ และแบบแท่งโลหะนาโนฝังตัวในสารไดอิเล็กตริก และชั้นที่สองถูกสร้างมาจากไดอิเล็กตริก การเปลี่ยนแปลงจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ ของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล ตัวอย่างเช่น ความหนาของแต่ละชั้น จำนวนคาบของโครงสร้าง มุมตกกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และเปอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะของโครงสร้าง การศึกษาโครงสร้างวัสดุแบบไฮเพอร์โบลิกจะมีขอบเขตในช่วงของคาบ (p) มีค่าน้อยกว่าความยาวคลื่น (λ_0) ที่ใช้ศึกษามาก ๆ ($p \ll \lambda_0$)



ภาพประกอบ 6 แสดงโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล

ความมุ่งหมายของงานวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งความมุ่งหมายไว้ดังนี้

1. เพื่อศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล
2. เพื่อศึกษาการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลในย่านความถี่ที่ตามองเห็น และรังสีอินฟราเรดคลื่นใกล้ ด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน

ความสำคัญของการวิจัย

1. คำนวณหาค่าการดูดกลืนของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน
2. ทำให้เข้าใจหลักการทางฟิสิกส์ของสมบัติการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล

ขอบเขตของการวิจัย

1. นำข้อมูลจากการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลแบบแท่งโลหะนาโน มาวิเคราะห์เพื่อออกแบบโครงสร้างของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลที่เหมาะสม
2. ศึกษาสมบัติการดูดกลืนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้ระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน

ประโยชน์ที่ได้รับของงานวิจัย

1. คำนวณหาค่าการดูดกลืนของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน
2. ได้ชุดคำสั่งสำหรับการคำนวณหาค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน

3. นำไปเป็นแนวทางในการพัฒนาเป็นอุปกรณ์ดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. อภิวัด (metamaterials) หมายถึงวัสดุประดิษฐ์เชิงวิศวกรรมที่มีสมบัติทางแสงที่ไม่ปรากฏตามธรรมชาติ โดยขึ้นกับชนิดวัสดุ ขนาด และรูปร่างขององค์ประกอบภายใน
2. โฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล (photonic hypercrystal) หมายถึงเป็นโครงสร้างเชิงแสงที่เกิดจากชั้นของอภิวัดแบบไฮเพอร์โบลิกและชั้นของไดอิเล็กตริกมาเรียงต่อกันเป็นคาบอย่างต่อเนื่องในหนึ่งมิติ
3. การกระจายตัวของคลื่น (wave dispersion) หมายถึงสมบัติของการกระจายตัวของคลื่นภายในตัวกลางชนิดต่าง ๆ
4. การแพร่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (wave propagation) หมายถึงการแพร่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวกลางใด ๆ

รายชื่อสัญลักษณ์

A	พื้นที่ทั้งหมดของโครงสร้าง (The unit cell area of the hexagon)
a	พื้นที่ภาคตัดขวางของโครงสร้าง (The cross-sectional area of a single metallic nanowire)
B	ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density)
$\vec{B}$	สนามแม่เหล็ก (Magnetic fields)
$B^{\parallel}, B^{\perp}$	สนามแม่เหล็กของอภิวัด (The magnetic field of the subwavelength metamaterial)
$B_m^{\parallel}, B_m^{\perp}$	สนามแม่เหล็กในชั้นโลหะ (Magnetic field in the metallic layers)
$B_d^{\parallel}, B_d^{\perp}$	สนามแม่เหล็กในชั้นไดอิเล็กตริก (Magnetic field in the dielectric layers)
c	ความเร็วของแสงในสุญญากาศ (Velocity of light in free space)
$\vec{D}$	เวกเตอร์ไฟฟ้ากระจัด (Electric displacement vector)
$\vec{E}$	สนามไฟฟ้า (Electric fields)

E_{1s}	สนามไฟฟ้าตกกระทบของชั้นที่ 1 (Electric field of incidence in layer 1)
E'_{1s}	สนามไฟฟ้าสะท้อนของชั้นที่ 1 (Electric field of reflective in layer 1)
E_{2s}	สนามไฟฟ้าส่งผ่านของชั้นที่ 2 (Electric field of transmittance in layer 2)
E'_{2s}	สนามไฟฟ้าสะท้อนของชั้นที่ 2 (Electric field of reflective in layer 2)
$E^{\parallel}, E^{\perp}$	สนามไฟฟ้าของอภิวัดที่มีความยาวคลื่นน้อย ๆ (The electric field of the subwavelength metamaterial)
$E_m^{\parallel}, E_m^{\perp}$	สนามไฟฟ้าในชั้นโลหะ (Electric field in the metallic layers)
$E_d^{\parallel}, E_d^{\perp}$	สนามไฟฟ้าในชั้นไดอิเล็กตริก (Electric field in the dielectric layers)
f	เปอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะของโครงสร้าง (Fill fraction)
$\vec{H}$	สนามแม่เหล็ก (Magnetic fields)
k_0	ค่าคงที่ของการแพร่กระจายในสุญญากาศ (Propagation constant in free space)
k_i	เวกเตอร์คลื่นตกกระทบ (Incidence of the wavevector)
k_t	เวกเตอร์คลื่นส่งผ่าน (Transverse of the wavevector)
l_1	ความหนาของชั้นโลหะ (Thickness of the metamaterial layer)
l_2	ความหนาของชั้นไดอิเล็กตริก (Thickness of the dielectric layer)
N	จำนวนคาบ (Number of period)
n_1	ดรรชนีหักเหของอภิวัด (Refractive index for metamaterial)
n_2	ดรรชนีหักเหของไดอิเล็กตริก (Refractive index for dielectric)
n_{air}	ดรรชนีหักเหของอากาศ (Refractive index for air)
n_{Au}	ดรรชนีหักเหของทองคำ (Refractive index for Au)

p	คาบ (Period)
R_s	ค่าการสะท้อน (Reflectance)
r	สัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection coefficient)
T_s	ค่าการส่งผ่าน (Transmittance)
t	สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission coefficient)
U	เมทริกซ์ถ่ายโอน (Transfer matrix)
ε_{xx}	องค์ประกอบของสภาพยอมทางไฟฟ้าในทิศทาง $\hat{x}$ (Effective permittivity tensor along x direction)
ε_{yy}	องค์ประกอบของสภาพยอมทางไฟฟ้าในทิศทาง $\hat{y}$ (Effective permittivity tensor along y direction)
ε_{zz}	องค์ประกอบของสภาพยอมทางไฟฟ้าในทิศทาง $\hat{z}$ (Effective permittivity tensor along z direction)
ε_m	สภาพยอมทางไฟฟ้าของโลหะ (Permittivity for metal)
ε_d	สภาพยอมทางไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก (Permittivity for dielectric)
ε_0	สภาพยอมทางไฟฟ้าในสุญญากาศ (Permittivity of free space)
$\bar{\varepsilon}$	เทนเซอร์สภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ (The relative permittivity tensors)
$\varepsilon_{m,\infty}$	สภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative permittivity)
μ_0	ความซึมซาบทางแม่เหล็กในสุญญากาศ (Permeability of free space)
$\bar{\mu}$	เทนเซอร์ความซึมซาบแม่เหล็ก (The relative permeability tensors)
θ_i	มุมตกกระทบของแสง (Angle of incidence)
θ_r	มุมสะท้อนของแสง (Angle of reflection)

θ_t	มุมส่งผ่านของแสง (Angle of transmission)
ω	ความถี่ของคลื่นที่แผ่รังสี (Frequency of radiation)
ω_{pm}	ความถี่พลาสมา (Plasma frequency)
λ	ความยาวคลื่น (Wavelength)
Λ	จำนวนคาบ (Period)
Γ_m	ความถี่ของการหน่วง (Damping frequency)
<i>Au</i>	ทองคำ (Gold)
<i>ITO</i>	อินเดียมทินออกไซด์ (Indium tin oxide: $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$)
<i>HMM</i>	อภิวัดแบบไฮเพอร์โบลิก (Hyperbolic metamaterial)
<i>PHC</i>	โฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล (Photonic hypercrystal)
<i>TMM</i>	ระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน (Transfer matrix method)
<i>TE</i>	สนามไฟฟ้าตัดขวาง (Transverse electric)
<i>TM</i>	สนามแม่เหล็กตัดขวาง (Transverse magnetic)

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. การสะท้อนและส่งผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อตัวกลาง
2. วิธีการระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอนสำหรับโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล
3. ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุแต่ละชนิด
4. ทฤษฎีตัวกลางประสิทธิผล (effective medium theory)
5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวกลางโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล

1. การสะท้อนและส่งผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อตัวกลาง

การสะท้อนและหักเหของคลื่นระนาบบริเวณรอยต่อตัวกลางสองชนิด (Noginov & Podolskiy, 2011) จะเกิดขึ้นเมื่อมีการตกกระทบของคลื่นแสงที่บริเวณรอยต่อตัวกลางสองชนิดที่แตกต่างกัน พบว่าคลื่นตกกระทบถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนได้แก่ คลื่นสะท้อนและคลื่นส่งผ่านหรือคลื่นที่เกิดการหักเหที่บริเวณรอยต่อตัวกลาง

กำหนดให้ θ_i , θ_r และ θ_t คือมุมตกกระทบ มุมสะท้อน และมุมส่งผ่าน ของเวกเตอร์คลื่นตามลำดับ ซึ่งเทียบกับเส้นปกติของระนาบตกกระทบ ความสัมพันธ์ของดรรชนีหักเหในแต่ละตัวกลางรวมทั้งมุมทั้งสามชนิดมีค่าตามกฎของสเนลล์ ดังนี้

$$n_i \sin \theta_i = n_r \sin \theta_r = n_t \sin \theta_t \quad (2.1)$$

โดยที่เวกเตอร์คลื่น (wave vector) ของคลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อน และคลื่นส่งผ่านมีค่าขึ้นกับดรรชนีหักเหของตัวกลางในบริเวณนั้นซึ่งขนาดของเวกเตอร์คลื่นเหล่านี้กำหนดได้จาก

$$|k_i| = |k_r| = \frac{\omega}{c} n_1, |k_t| = \frac{\omega}{c} n_2 \quad (2.2)$$

และกำหนดเงื่อนไขขอบเขตบริเวณรอยต่อที่ $z = 0$ ทิศทางของเวกเตอร์คลื่นมีค่าเท่ากันตามสมการ

$$(k_i \cdot \hat{r})_{z=0} = (k_r \cdot \hat{r})_{z=0} = (k_t \cdot \hat{r})_{z=0} \quad (2.3)$$

ระบบพิกัดและสัญลักษณ์ที่ใช้แสดงการเกิดการสะท้อนและการส่งผ่านที่บริเวณรอยต่อตัวกลางสองชนิดที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าสภาพความซึมซาบแม่เหล็กเป็น ϵ_1 , μ_1 และ ϵ_2 , μ_2 ตามลำดับ

สมการคลื่นที่แพร่ในตัวกลางเป็นดังสมการ

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \text{ และ } \nabla^2 \vec{H} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.4)$$

โดยผลเฉลยทั่วไปของสมการคลื่นสำหรับสนามไฟฟ้าสามารถเขียนอยู่ในรูปผลรวมของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนของแต่ละตัวกลาง

$$\vec{E} = \begin{cases} (E_1 e^{-ik_1 \cdot \hat{r}} + E_1' e^{-ik_1' \cdot \hat{r}}) e^{i\omega t}, & z < 0 \\ (E_2 e^{-ik_2 \cdot \hat{r}} + E_2' e^{-ik_2' \cdot \hat{r}}) e^{i\omega t}, & z > 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

เมื่อ E_1 , E_1' , E_2 และ E_2' คือค่าคงที่แอมพลิจูดสนามไฟฟ้าเชิงซ้อนสำหรับคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนในแต่ละตัวกลาง และ k_1 คือเวกเตอร์คลื่นตกกระทบและ k_2 คือเวกเตอร์คลื่นส่งผ่าน โดย k_1' และ k_2' คือภาพสะท้อนของเวกเตอร์คลื่น k_1 และ k_2

ผลเฉลยทั่วไปของสมการคลื่นสำหรับสนามแม่เหล็ก ดังสมการ

$$\vec{H} = \frac{i}{\omega\mu} \nabla \times \vec{E} \quad (2.6)$$

การแพร่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีทิศทางการโพลาริไซในโหมดดังต่อไปนี้

1.1 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าตัดขวาง (transverse electromagnetic: TEM)

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าตัดขวางเป็นคลื่นระนาบสม่ำเสมอจะประกอบด้วยทั้งสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่มีการวางตัวอยู่ในแนวตัดขวางกับระนาบของคลื่น นั่นคือเป็นโหมดของคลื่นที่เคลื่อนที่ไปตามตัวกลางจะมีส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับทิศการเดินทางหรือการแพร่กระจายของคลื่น โดยที่ไม่มีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น

1.2 สนามไฟฟ้าตัดขวาง (transverse electric: TE)

สนามไฟฟ้าตัดขวางเป็นโหมดของคลื่นที่เคลื่อนที่ไปตามตัวกลางจะมีเพียงส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าเท่านั้นที่ตั้งฉากกับทิศการเดินทางของคลื่น โดยที่ไม่มีสนามไฟฟ้าในทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น หรือเมื่อสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับระนาบของการตกกระทบ เรียกว่าโพลาริเซชัน s จะแสดงดังภาพประกอบ 7(a)

การสะท้อนและส่งผ่านของคลื่นโพลาริไซแบบ TE

กำหนดให้ $\vec{E}_y$ และ $\vec{E}_x$ มีค่าต่อเนื่องที่ $z = 0$

$$\vec{E}_{1s} + \vec{E}_{1s}' = \vec{E}_{2s} + \vec{E}_{2s}' \quad (2.7)$$

$$\sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} (\vec{E}_{1s} - \vec{E}_{1s}') \cos \theta_1 = \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\mu_2}} (\vec{E}_{2s} - \vec{E}_{2s}') \cos \theta_2 \quad (2.8)$$

เมื่อ θ_1 และ θ_2 คือมุมของเวกเตอร์คลื่น k_1 และ k_2 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเส้นปกติของระนาบตกกระทบ จากสมการเงื่อนไขด้านบนสามารถเขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์ดังนี้

$$D_{1s} \begin{bmatrix} \vec{E}_{1s} \\ \vec{E}_{1s}' \end{bmatrix} = D_{2s} \begin{bmatrix} \vec{E}_{2s} \\ \vec{E}_{2s}' \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

เมื่อ

$$D_{js} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \sqrt{\frac{\epsilon_j}{\mu_j}} \cos \theta_j & -\sqrt{\frac{\epsilon_j}{\mu_j}} \cos \theta_j \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

โดยเมทริกซ์ D_{js} คือ เมทริกซ์พลวัต (Dynamical matrix) ของคลื่นโพลาไรซ์แบบ s (Li, Li, & Zhang, 2007) สำหรับตัวกลางที่ j ($j = 1$ และ 2) ถ้าแสงตกกระทบจากตัวกลางที่ 1 ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสำหรับรอยต่อเดียวมีค่าเท่ากับ

$$r_s = \left(\frac{\vec{E}_{1s}'}{\vec{E}_{1s}} \right)_{E_{2s}=0} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (2.11)$$

และ

$$t_s = \left(\frac{\vec{E}_{2s}}{\vec{E}_{1s}} \right)_{E_{2s}=0} = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (2.12)$$

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

1.3 สนามแม่เหล็กตัดขวาง (transverse magnetic: TM)

สนามแม่เหล็กตัดขวางเป็นโหมดของคลื่นที่เคลื่อนที่ไปตามตัวกลางจะมีเพียงส่วนประกอบของสนามแม่เหล็กเท่านั้นที่ตั้งฉากกับทิศทางการเดินทางของคลื่น โดยที่ไม่มีสนามแม่เหล็กในทิศทางของการเคลื่อนที่ของคลื่น เรียกว่าโพลาไรเซชัน p จะแสดงดังภาพประกอบ 7(b)

การสะท้อนและส่งผ่านของคลื่นโพลาไรซ์แบบ TM

กำหนดให้ $\vec{E}_y$ และ $\vec{E}_x$ มีค่าต่อเนื่องที่ $z = 0$

$$(\vec{E}_{1p} + \vec{E}_{1p}') \cos \theta_1 = (\vec{E}_{2p} + \vec{E}_{2p}') \cos \theta_2 \quad (2.13)$$

$$\sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} (\vec{E}_{1p} - \vec{E}_{1p}') = \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\mu_2}} (\vec{E}_{2p} - \vec{E}_{2p}') \quad (2.14)$$

จากสมการเงื่อนไขด้านบนสามารถเขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์ดังนี้

$$D_{1p} \begin{bmatrix} \vec{E}_{1p} \\ \vec{E}_{1p}' \end{bmatrix} = D_{2p} \begin{bmatrix} \vec{E}_{2p} \\ \vec{E}_{2p}' \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

เมื่อ

$$D_{jp} = \begin{bmatrix} \cos \theta_j & -\cos \theta_j \\ \sqrt{\frac{\epsilon_j}{\mu_j}} & \sqrt{\frac{\epsilon_j}{\mu_j}} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

โดยเมทริกซ์ D_{jp} คือ เมทริกซ์พลวัตของคลื่นโพลาไรซ์แบบ p สำหรับตัวกลางที่ j (j = 1 และ 2) ถ้าแสงตกกระทบจากตัวกลางที่ 1 ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสำหรับรอยต่อเดียวมีค่าเท่ากับ

$$r_p = \left(\frac{\vec{E}_{1p}}{\vec{E}_{1p}} \right)_{E_{2p}=0} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (2.17)$$

และ

$$t_p = \left(\frac{\vec{E}_{2p}}{\vec{E}_{1p}} \right)_{E_{2p}=0} = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (2.18)$$

โดยที่ค่าสภาพซึมซาบทางแม่เหล็กมีค่าคงที่ในทั้งสองตัวกลาง $\mu_1 = \mu_2$ สำหรับความถี่ในย่านแสงที่ตามองเห็น

เราสามารถคำนวณหาค่าการสะท้อน ค่าการส่งผ่าน และค่าการดูดกลืนสำหรับรอยต่อเดียวได้ด้วยการใช้สัมประสิทธิ์ การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของเฟรสเนล เพื่อนำมาคำนวณหาค่าการสะท้อนและค่าการส่งผ่านสำหรับคลื่นโพลาไรซ์แบบ TE (s) และแบบ TM (p) ได้ดังนี้

$$R_s = |r_s|^2 \quad (2.19)$$

$$R_p = |r_p|^2 \quad (2.20)$$

และ

$$T_s = \frac{n_2 \cos \theta_2 |t_s|^2}{n_1 \cos \theta_1} \quad (2.21)$$

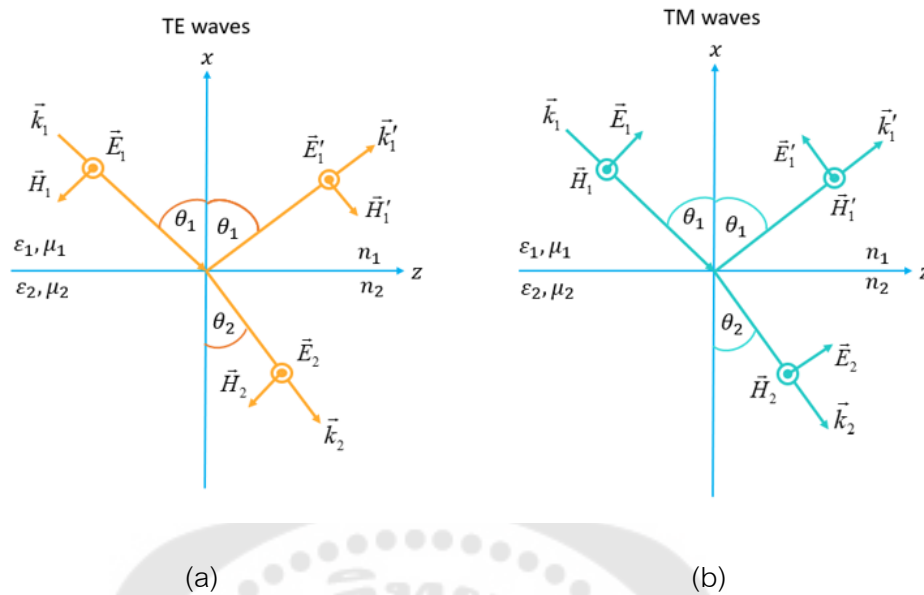
$$T_p = \frac{n_2 \cos \theta_2 |t_p|^2}{n_1 \cos \theta_1} \quad (2.22)$$

ค่าการดูดกลืน

$$A_s = 1 - T_s - R_s \quad (2.23)$$

$$A_p = 1 - T_p - R_p \quad (2.24)$$

ซึ่งสำหรับตัวกลางที่เป็นสารไดอิเล็กตริกขี้นวิสุทธิ (ไม่มีสมบัติดูดกลืน) ที่มีดรรชนีหักเหเป็นจำนวนจริงแล้วสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านและค่าการสะท้อนได้เป็น $R + T = 1$ หรือเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน แต่สำหรับตัวกลางที่มีคุณสมบัติการดูดกลืนหรือมีดรรชนีหักเหเป็นจำนวนเชิงซ้อนแล้วความสัมพันธ์ของค่าการสะท้อนและค่าการส่งผ่านจะเปลี่ยนเป็นค่าการดูดกลืนของตัวกลาง



ภาพประกอบ 7 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นผ่านตัวกลางสองชนิด (a) ทิศของการโพลาไรซ์แบบ TE และ (b) ทิศของการโพลาไรซ์แบบ TM

2. วิธีการระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน (transfer matrix method) สำหรับโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล

2.1 กระบวนการของระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน

ลักษณะของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลเกิดจากอภิวัดคู่เรียงตัวต่อกันขึ้นไดอิเล็กทริกมีดรรชนีหักเหเป็น n_1 และ n_2 มีความหนาของแต่ละชั้นเท่ากับ l_1 และ l_2 และมีความยาวคาบเท่ากับ Λ จะแสดงดังภาพประกอบ 8

พบว่าเมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาตกกระทบบนบริเวณผิวหน้าของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล ทำให้เกิดการสะท้อนและส่งผ่านแบบเฟรชเนล ซึ่งจะเกิดปรากฏการณ์เหล่านี้ไปในทุกชั้นไดอิเล็กทริก ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาการสะท้อนและหักเหได้เช่นเดียวกันกับการสะท้อนและหักเหในสารไดอิเล็กทริกชั้นเดียวเพื่อลดความซับซ้อน

กระบวนการของระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน (Li et al., 2007) เริ่มต้นจากการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงดรรชนีหักเหตามแนวแกน $\hat{z}$ ของโครงสร้างสามารถเขียนในรูปแบบฟังก์ชันคาบโดย $\Lambda = l_1 + l_2$ เป็นดังสมการ

$$n(z) = \begin{cases} n_1, & 0 < z < l_1 \\ n_2, & l_1 < z < \Lambda \end{cases} \quad (2.25)$$

และ

$$n(z) = n(z + \Lambda) \quad (2.26)$$

การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามแนวแกน $\hat{z}$ ภายในโครงสร้าง สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของผลรวมสนามไฟฟ้าที่มีการแพร่ในทิศฟอร์เวิร์ดและแบคเวิร์ดภายในตัวกลางเป็นดังสมการ

$$\vec{E}(z) = \begin{cases} A_n e^{ik_{1z}l_1} + B_n e^{-ik_{1z}l_1}, & (n-1)\Lambda < z < n\Lambda - l_2 \\ C_n e^{ik_{2z}l_2} + D_n e^{-ik_{2z}l_2}, & n\Lambda - l_2 < z < n\Lambda \end{cases} \quad (2.27)$$

โดยองค์ประกอบเวกเตอร์คลื่นตามแนวแกน $\hat{z}$ ภายในตัวกลางแต่ละชนิดมีค่าเป็นดังสมการ

$$k_{1z} = \left[\left(\frac{\omega}{c} n_1 \right)^2 - k_{1x}^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{\omega}{c} n_1 \cos \theta_1 \quad (2.28)$$

$$k_{2z} = \left[\left(\frac{\omega}{c} n_2 \right)^2 - k_{2x}^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{\omega}{c} n_2 \cos \theta_2 \quad (2.29)$$

เมื่อ θ_1 และ θ_2 คือ มุมของแสงภายในตัวกลางแต่ละชนิด ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าภายในตัวกลางแต่ละชั้นได้ในรูปเมทริกซ์เป็นดังสมการ

$$\begin{bmatrix} A_{n-1} \\ B_{n-1} \end{bmatrix} = D_1^{-1} D_2 P_2 \begin{bmatrix} C_{n-1} \\ D_{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

และ

$$\begin{bmatrix} C_{n-1} \\ D_{n-1} \end{bmatrix} = D_2^{-1} D_1 P_1 \begin{bmatrix} A_n \\ B_n \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

เมื่อเมทริกซ์ D_1 และ D_2 คือเมทริกซ์พลวัต ซึ่งมีค่าตามสมการ (2.10) และ P_j คือเมทริกซ์การแพร่ (propagation matrix) สำหรับตัวกลางแต่ละชนิดซึ่งเป็นเมทริกซ์ที่แสดงการเปลี่ยนเฟสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลาง เมื่อ $j = 1$ และ 2 โดยมีค่าเป็นดังสมการ

$$P_j = \begin{bmatrix} e^{ik_{jz}l_j} & 0 \\ 0 & e^{-ik_{jz}l_j} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

แทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ลงในเมทริกซ์ D_1 , D_2 , P_1 และ P_2 ดังนั้นสมการ (2.30) และสมการ (2.31) จึงมีค่าเปลี่ยนเป็นดังสมการ

$$\begin{bmatrix} A_{n-1} \\ B_{n-1} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} e^{ik_{2z}l_2} \left(1 + \frac{k_{2z}}{k_{1z}} \right) & e^{-ik_{2z}l_2} \left(1 - \frac{k_{2z}}{k_{1z}} \right) \\ e^{ik_{2z}l_2} \left(1 - \frac{k_{2z}}{k_{1z}} \right) & e^{-ik_{2z}l_2} \left(1 + \frac{k_{2z}}{k_{1z}} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{n-1} \\ D_{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

และ

$$\begin{bmatrix} C_{n-1} \\ D_{n-1} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} e^{ik_{1z}l_1} \left(1 + \frac{k_{1z}}{k_{2z}} \right) & e^{-ik_{1z}l_1} \left(1 - \frac{k_{1z}}{k_{2z}} \right) \\ e^{ik_{1z}l_1} \left(1 - \frac{k_{1z}}{k_{2z}} \right) & e^{-ik_{1z}l_1} \left(1 + \frac{k_{1z}}{k_{2z}} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_n \\ B_n \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

แทนค่าเมทริกซ์ $\begin{bmatrix} C_{n-1} \\ D_{n-1} \end{bmatrix}$ ลงในสมการ (2.33) 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 ได้เป็นดังสมการ

$$\begin{bmatrix} A_{n-1} \\ B_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} \\ u_{21} & u_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_n \\ B_n \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

ซึ่งเมทริกซ์ $\begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} \\ u_{21} & u_{22} \end{bmatrix}$ เรียกว่า “เมทริกซ์ถ่ายโอน” (transfer matrix) (Li et al., 2007) สำหรับคู่ชั้นไดอิเล็กตริก 1 คาบ สมาชิกของเมทริกซ์ถ่ายโอนแต่ละตัวมีค่าเป็นดังสมการ

$$u_{11} = e^{ik_{1z}l_1} \left[\cos k_{2z}l_2 + \frac{1}{2}i \left(\frac{k_{2z}}{k_{1z}} + \frac{k_{1z}}{k_{2z}} \right) \sin k_{2z}l_2 \right] \quad (2.36)$$

$$u_{12} = e^{-ik_{1z}l_1} \left[\frac{1}{2}i \left(\frac{k_{2z}}{k_{1z}} - \frac{k_{1z}}{k_{2z}} \right) \sin k_{2z}l_2 \right] \quad (2.37)$$

$$u_{21} = e^{ik_{1z}l_1} \left[-\frac{1}{2}i \left(\frac{k_{2z}}{k_{1z}} - \frac{k_{1z}}{k_{2z}} \right) \sin k_{2z}l_2 \right] \quad (2.38)$$

$$u_{22} = e^{-ik_{1z}l_1} \left[\cos k_{2z}l_2 - \frac{1}{2}i \left(\frac{k_{2z}}{k_{1z}} + \frac{k_{1z}}{k_{2z}} \right) \sin k_{2z}l_2 \right] \quad (2.39)$$

สำหรับกรณีคลื่นตกกระทบเป็นคลื่นโพลาไรซ์แบบ s และสำหรับคลื่นโพลาไรซ์แบบ p สมาชิกของเมทริกซ์ถ่ายโอนมีค่าเป็นดังสมการ

$$u_{11} = e^{ik_{1z}l_1} \left[\cos k_{2z}l_2 + \frac{1}{2}i \left(\frac{n_2^2 k_{1z}}{n_1^2 k_{2z}} + \frac{n_1^2 k_{2z}}{n_2^2 k_{1z}} \right) \sin k_{2z}l_2 \right] \quad (2.40)$$

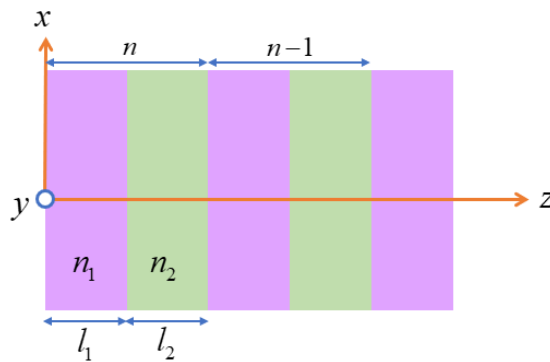
$$u_{12} = e^{-ik_{1z}l_1} \left[\frac{1}{2}i \left(\frac{n_2^2 k_{1z}}{n_1^2 k_{2z}} - \frac{n_1^2 k_{2z}}{n_2^2 k_{1z}} \right) \sin k_{2z}l_2 \right] \quad (2.41)$$

$$u_{21} = e^{ik_{1z}l_1} \left[-\frac{1}{2}i \left(\frac{n_2^2 k_{1z}}{n_1^2 k_{2z}} - \frac{n_1^2 k_{2z}}{n_2^2 k_{1z}} \right) \sin k_{2z}l_2 \right] \quad (2.42)$$

$$u_{22} = e^{-ik_{1z}l_1} \left[\cos k_{2z}l_2 - \frac{1}{2}i \left(\frac{n_2^2 k_{1z}}{n_1^2 k_{2z}} + \frac{n_1^2 k_{2z}}{n_2^2 k_{1z}} \right) \sin k_{2z}l_2 \right] \quad (2.43)$$

โครงสร้างแถบช่องว่างทางแสงมีจำนวนคาบของคู่ชั้นไดอิเล็กตริกเท่ากับ n แล้วสมการแสดงความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดสนามไฟฟ้าภายในชั้นที่ $n-1$ กับชั้นที่ n จึงมีค่าเปลี่ยนเป็นดังสมการ

$$\begin{bmatrix} A_{n-1} \\ B_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} \\ u_{21} & u_{22} \end{bmatrix}^n \begin{bmatrix} A_n \\ B_n \end{bmatrix} \quad (2.44)$$



ภาพประกอบ 8 แสดงการเปลี่ยนแปลงของดรรชนีหักเหตามแนวแกน z ของโครงสร้าง

2.2 ค่าการสะท้อน ส่งผ่าน และดุดกลืนสำหรับโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล

การสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวแบบเป็นคาบซึ่งการเลี้ยวเบนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในโครงสร้างนี้คล้ายคลึงกับการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ผ่านโครงผลึกของแข็งที่มีคุณสมบัติความเป็นคาบเช่นกัน

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล เป็นดังสมการ

$$r = \left(\frac{B_0}{A_0} \right)_{B_{n=0}} \quad (2.45)$$

และสัมประสิทธิ์การส่งผ่านอยู่ในรูปอัตราส่วนของสนามไฟฟ้าที่ส่งผ่านออกมาจากสารไดอิเล็กตริกชั้นสุดท้ายกับสนามไฟฟ้าตกกระทบเป็นดังสมการ

$$t = \left(\frac{A_N}{A_0} \right)_{B_{N=0}} \quad (2.46)$$

เมทริกซ์แสดงความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดสนามไฟฟ้าตกกระทบและแอมพลิจูดสนามไฟฟ้าส่งผ่านเป็นดังสมการ

$$\begin{bmatrix} A_0 \\ B_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} \\ u_{21} & u_{22} \end{bmatrix}^N \begin{bmatrix} A_N \\ B_N \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

เมื่อกำลังที่ N ของเมทริกซ์ถ่ายโอนเป็นดังสมการ

$$\begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} \\ u_{21} & u_{22} \end{bmatrix}^N = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} \\ U_{21} & U_{22} \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของโครงสร้างระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน ที่มีจำนวนคาบเป็น N เมื่อแทนค่า $B_N = 0$ เป็นดังสมการ

$$r = \frac{U_{21}}{U_{11}} \quad (2.49)$$

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของโครงสร้างหาได้จากการยกกำลังสองค่าสัมบูรณ์ของสัมประสิทธิ์การสะท้อนเป็นดังสมการ

$$R = |r|^2 = \left| \frac{U_{21}}{U_{11}} \right|^2 \quad (2.50)$$

สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล ที่มีจำนวนคาบเป็น N เมื่อแทนค่า $B_N = 0$ เป็นดังสมการ

$$t = \frac{1}{U_{11}} \quad (2.51)$$

สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของโครงสร้างหาได้จากการยกกำลังสองค่าสัมบูรณ์ของสัมประสิทธิ์การสะท้อนเป็นดังสมการ

$$T = |t|^2 = \left| \frac{1}{U_{11}} \right|^2 \quad (2.52)$$

ในกรณีที่สิ่งแวดลอมที่อยู่รอบโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลไม่เป็นอากาศทั้งหมด โดยพิจารณาให้บริเวณที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบด้วยมุม θ_0 มีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ n_0 และฐานรองของโครงสร้างมีดัชนีหักเหเท่ากับ n_s แล้วค่าการส่งผ่าน จึงเปลี่ยนเป็นดังสมการ

$$T = \frac{n_s \cos \theta_s}{n_0 \cos \theta_0} \left| \frac{1}{U_{11}} \right|^2 \quad (2.53)$$

ดังนั้นค่าการดูดกลืนเป็นดังสมการ

$$A = 1 - T - R \quad (2.54)$$

3. ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุแต่ละชนิด

โครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลเกิดจากการนำโลหะและวัสดุไดอิเล็กตริกเข้ามาเป็นส่วนประกอบของโครงสร้าง เมื่อพิจารณาโครงสร้างจะมีองค์ประกอบของชั้น l_1 สร้างด้วยแท่งนาโนทองคำซึ่งถูกฝังอยู่ในช่องว่างของอินเดียมทินออกไซด์ และชั้น l_2 สร้างด้วยอินเดียมทินออกไซด์

เนื่องจากโลหะและไดอิเล็กตริกเป็นวัสดุที่มีสมบัติการดูดกลืนที่ดี เมื่อนำมาประกอบโครงสร้างเข้าด้วยกัน ส่งผลให้โครงสร้างชนิดนี้มีสมบัติในการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีขึ้น

3.1 วัสดุชนิดโลหะ

เมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาตกกระทบกับวัสดุที่เป็นโลหะ ภายในโลหะจะประกอบด้วยอิเล็กตรอนอิสระ เมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านเข้าไปในวัสดุชนิดโลหะ อิเล็กตรอนอิสระจะไม่เคลื่อนที่รอบ ๆ อะตอมเหมือนอิเล็กตรอนของสารไดอิเล็กตริก แต่จะเกิดการเคลื่อนที่อย่างอิสระตามทิศของสนามไฟฟ้า

สมการการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระสามารถเขียนได้เป็น

$$m \frac{d^2 X}{dt^2} + m\gamma \frac{dX}{dt} = -e\vec{E} \quad (2.55)$$

เมื่อ X คือ ตำแหน่งของอิเล็กตรอนสัมพันธ์กับอะตอม

m คือ มวลของอิเล็กตรอน

e คือ ค่าประจุของอิเล็กตรอน

$\vec{E}$ คือ สนามไฟฟ้า โดย $\vec{E} = E_0 e^{i\omega t}$

γ คือ มวลลดทอน

ผลเฉลยของสมการ มีค่าดังนี้

$$X = \frac{eE_0}{m(\omega^2 - i\omega\gamma)} e^{i\omega t} \quad (2.56)$$

ไดโพลโมเมนต์ของอิเล็กตรอนภายในอะตอม มีค่าดังนี้

$$p = -eX = -\frac{e^2}{m(\omega^2 - i\gamma\omega)} E \quad (2.57)$$

สามารถนิยามการโพลาไรซ์ของอะตอมโลหะหรือ δ ได้ดังนี้

$$\delta = -\frac{e^2}{m(\omega^2 - i\gamma\omega)} \quad (2.58)$$

ดรรชนีหักเหของวัสดุคือ $n^2 = 1 + \frac{N\delta}{\epsilon_0}$ ดังนั้นดรรชนีหักเหของโลหะจึงมีค่าเท่ากับ

$$n^2 = 1 - \frac{Ne^2}{m\epsilon_0(\omega^2 - i\gamma\omega)} \quad (2.59)$$

เมื่อ N คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในโลหะ และพิจารณาให้ $\gamma \ll \omega$

$$n^2 \approx 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (2.60)$$

เมื่อความถี่พลาสมาเป็นดังสมการ

$$\omega_p^2 = \frac{Ne^2}{m\epsilon_0} \quad (2.61)$$

โดยชั้นที่เป็นโลหะสามารถอธิบายด้วยทฤษฎีของ Drude model (Palik, 1998) เพื่อทราบค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของโลหะที่เลือกใช้

สมการของ Drude model สามารถหาได้จาก

$$\epsilon_m = \epsilon_{m,\infty} - \frac{\omega_{pm}^2}{\omega^2 + i\Gamma_m\omega} \quad (2.62)$$

เมื่อ $\epsilon_{m,\infty}$ คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ $\epsilon_{m,\infty} = 5$

ω_{pm} คือ ความถี่พลาสมา $\omega_{pm} = 1.38 \times 10^{16} \text{ rad / s}$

Γ_m คือ ความถี่ของการหน่วง (damping frequency) $\Gamma_m = 5.07 \times 10^{13} \text{ rad / s}$

ตาราง 1 แสดงค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนของโลหะชนิดต่าง ๆ

ชื่อโลหะ	ดรรชนีหักเห	ความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (นาโนเมตร)							
		400	500	600	700	800	900	1000	1200
Ag	n	0.050	0.050	0.055	0.041	0.037	0.040	0.040	0.084
	k	2.104	3.131	4.010	4.803	5.570	6.371	7.115	8.699
Au	n	1.468	0.971	0.249	0.131	0.154	0.174	0.228	0.340
	k	1.953	1.874	3.074	4.062	4.908	5.723	6.473	8.021
Al	n	0.488	0.813	1.262	1.921	2.767	2.111	1.436	1.320
	k	4.835	6.048	7.185	8.142	8.354	8.220	9.495	11.794
Cu	n	1.313	1.213	0.494	0.211	0.253	0.302	0.326	0.465
	k	2.131	2.571	2.962	4.159	5.013	5.825	6.543	8.116
Pb	n	-	-	-	1.782	1.506	1.398	1.360	1.391
	k	-	-	-	3.553	4.044	4.647	5.260	6.479

(Johnson & Christy, 1972a)

3.2 วัสดุชนิดไดอิเล็กตริก

ชั้นวัสดุที่เป็นไดอิเล็กตริก สามารถหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าได้ด้วยทฤษฎีการกระจายของ Cauchy dispersion formula (Ren, Chen, & Zhang, 2011) ดังนี้

$$\varepsilon_d = n_d^2 = \left[A + \frac{10^4 \cdot B}{\lambda^2} + \frac{10^9 \cdot C}{\lambda^4} \right]^2 \quad (2.63)$$

เมื่อ ความสัมพันธ์ของความยาวคลื่น $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$

$A = 2.374$, $B = 1.932$ และ $C = 6.855$

c คือ ความเร็วแสงในสุญญากาศ $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$

λ คือ ความยาวคลื่น มีหน่วยเป็นนาโนเมตร (nm)

ตาราง 2 ตารางแสดงค่าดรรชนีหักเหเชิงซ้อนของไดอิเล็กตริกชนิดต่างๆ

ชื่อ ไดอิเล็กตริก	ดรรชนี หักเห	ความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (นาโนเมตร)							
		400	500	600	700	800	900	1000	1200
ITO	n	2.063	1.960	1.894	1.835	1.775	1.709	1.635	-
	k	0.012	0.003	0.002	0.003	0.005	0.007	0.010	-
SiO ₂	n	1.470	1.462	1.458	1.455	1.453	1.452	1.450	1.458
TiO ₂	n	-	2.711	2.605	2.551	2.520	2.499	2.486	2.468

(Malitson, 1965)

4. ทฤษฎีตัวกลางประสิทธิผล (effective medium theory)

โครงสร้างผลึกโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลเป็นวัสดุที่สามารถควบคุมการแพร่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในโครงสร้างนี้ได้ ในลักษณะเดียวกับการควบคุมการแพร่ของอิเล็กตรอนภายในโครงสร้างผลึกของแข็ง โดยโครงสร้างผลึกโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลถูกออกแบบให้มีการจัดเรียงของอนุภาคหรือโมเลกุลให้เกิดคุณสมบัติความเป็นคาบ เนื่องจากความแตกต่างของดรรชนีหักเหของวัสดุที่เลือกใช้ โครงสร้างของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลจะประกอบด้วยชั้นที่เป็นโลหะและไดอิเล็กตริก ในการเลือกวัสดุจึงต้องคำนึงถึงสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยใช้ทฤษฎีสำหรับตัวกลางประสิทธิผล (Noginov & Podolskiy, 2011) ได้แก่ Maxwell Garnett theory และ Bruggeman theory

4.1 ทฤษฎีตัวกลางประสิทธิผลสำหรับตัวกลางระบบวางซ้อนกันเป็นชั้น ๆ (multilayer system)

สภาพยอมทางไฟฟ้าของตัวกลางประสิทธิผล (Ferrari et al., 2015) สำหรับการวางตัวของโครงสร้างซ้อนกันเป็นชั้น ๆ แบบมีสมบัติไม่เท่ากันทุกทิศทาง (anisotropic) ที่มีสมมาตรเป็นแกนแสงแกนเดียว (uniaxial) ในการวิเคราะห์จะใช้วิธีการแมกซ์เวลล์ (Maxwell Garnett) สำหรับสภาพยอมทางไฟฟ้าประสิทธิผลในทิศทางขนาน ($\epsilon_{\parallel}$) และตั้งฉาก ($\epsilon_{\perp}$) ของวัสดุประเภทอภิวัดแบบวางซ้อนกันเป็นชั้น ๆ ชั้นโลหะและไดอิเล็กตริกมีสภาพยอมทางไฟฟ้าเป็น ϵ_m และ ϵ_d ตามลำดับ ลำดับต่อมาสามารถหาเปอร์เซ็นต์ของปริมาตรความเป็นโลหะ (fill fraction) ในระบบความหนาของอภิวัดได้ดังนี้

$$f = \frac{l_m}{l_m + l_d} \quad (2.64)$$

เมื่อ l_m คือ ความหนารวมของชั้นโลหะ

l_d คือ ความหนารวมของชั้นไดอิเล็กตริก

สภาพยอมทางไฟฟ้าประสิทธิผลในทิศทางขนาน (effective parallel permittivity) สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบของเทนเซอร์สภาพยอมทางไฟฟ้าในแนวขนานของระบบตัวกลางวางตัวซ้อนกันเป็นชั้น ๆ โดยเริ่มต้นจากการกระจายสนามไฟฟ้า ($\vec{D}$) ที่แสดงถึงสนามไฟฟ้า ($\vec{E}$) ผ่านสมการต่อไปนี้

$$\vec{D} = \bar{\epsilon}_{eff} \vec{E} \quad (2.65)$$

เมื่อ $\bar{\epsilon}_{eff}$ คือสภาพยอมทางไฟฟ้าประสิทธิผลของตัวกลาง มาจากไฟฟ้าสถิต (electrostatics) ของเส้นสัมผัสขององค์ประกอบสนามไฟฟ้าที่ต้องต่อเนื่องในการข้ามส่วนที่ซ้อนทับกันของตัวกลางหนึ่งไปอีกตัวกลางหนึ่ง สามารถได้แสดงได้ดังนี้

$$\vec{E}_m^{\parallel} = \vec{E}_d^{\parallel} = \vec{E}^{\parallel} \quad (2.66)$$

เมื่อ $\vec{E}_m^{\parallel}$ คือ สนามไฟฟ้าในชั้นโลหะ

$\vec{E}_d^{\parallel}$ คือ สนามไฟฟ้าในชั้นไดอิเล็กตริก

$\vec{E}^{\parallel}$ คือ สนามไฟฟ้าของอภิวัดที่มีความยาวคลื่นน้อย ๆ (subwavelength)

จากความต่อเนื่องการกระจายทางไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก (displacement) ในทิศทางการกระจายตัวแนวขนาน โดยสามารถหาการกระจายทางไฟฟ้าทั้งหมดโดยเฉลี่ยของสนามไฟฟ้าจากองค์ประกอบของโลหะและไดอิเล็กตริก

$$\vec{D}^{\parallel} = f\vec{D}_m^{\parallel} + (1-f)\vec{D}_d^{\parallel} \quad (2.67)$$

เป็นดั่งสมการ

$$\varepsilon_{eff}^{\parallel} \vec{E}^{\parallel} = f \varepsilon_m \vec{E}^{\parallel} + (1-f) \varepsilon_d \vec{E}^{\parallel} \quad (2.68)$$

ถ้าตัดส่วนประกอบที่เป็นของสนามไฟฟ้าออกไป จะได้สมการสุดท้ายเป็นดั่งสมการ

$$\varepsilon_{\parallel} = f \varepsilon_m + (1-f) \varepsilon_d \quad (2.69)$$

สภาพยอมทางไฟฟ้าประสิทธิผลในทิศตั้งฉาก (effective perpendicular permittivity) เพื่อให้ได้สภาพยอมทางไฟฟ้าในทิศตั้งฉาก สามารถเริ่มต้นจากสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell) และใช้เงื่อนไขขอบเขตของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งองค์ประกอบโดยทั่วไปของเวกเตอร์การกระจัดทางไฟฟ้าที่เกิดการอินเตอร์เฟสต่อเนื่องจะแสดงดังต่อไปนี้

$$\vec{D}_m^{\perp} = \vec{D}_d^{\perp} = \vec{D}^{\perp} \quad (2.70)$$

เราจะทราบขนาดรวมของสนามไฟฟ้าจะมีการทับซ้อนกันขององค์ประกอบสนามไฟฟ้าจากชั้นไดอิเล็กตริกและชั้นโลหะ ดังนั้นสามารถกำหนด

$$\vec{E}^{\perp} = f \vec{E}_m^{\perp} + (1-f) \vec{E}_d^{\perp} \quad (2.71)$$

เมื่อ $\vec{E}_m^{\perp}$ คือ องค์ประกอบแนวทิศตั้งฉากของสนามไฟฟ้าในส่วนของโลหะ

$\vec{E}_d^{\perp}$ คือ องค์ประกอบแนวทิศตั้งฉากของสนามไฟฟ้าในส่วนของไดอิเล็กตริก

$\vec{E}^{\perp}$ คือ สนามไฟฟ้ารวมของระบบการวางตัวซ้อนกันเป็นชั้น ๆ

จากเงื่อนไขขอบเขตและสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell) และไม่ต้องสนใจในเทอมของสนามไฟฟ้าและแก้ปัญหาสำหรับ $\varepsilon_{\perp}$ จะแสดงการวิเคราะห์สำหรับสภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุเมทอะเมทที่เรียลวางตัวซ้อนกันเป็นชั้น ๆ มีทิศทางในแนวตั้งฉาก

$$\varepsilon_{\perp} = \frac{\varepsilon_m \varepsilon_d}{f \varepsilon_d + (1-f) \varepsilon_m} \quad (2.72)$$

4.2 ทฤษฎีตัวกลางประสิทธิผลสำหรับตัวกลางระบบแท่งนาโน (nanowire system)

สภาพยอมทางไฟฟ้าของตัวกลางประสิทธิผลสำหรับการวางตัวของโครงสร้างของแท่งนาโน (Yao et al., 2011) แบบมีสมบัติไม่เท่ากันทุกทิศทาง (anisotropic) ที่มีสมมาตรเป็นแกนแสงแกนเดียว (uniaxial) ในการวิเคราะห์จะใช้วิธีการแมกซ์เวลล์การ์เนตต์ (Maxwell Garnett) สำหรับสภาพยอมทางไฟฟ้าประสิทธิผลในทิศทางขนาน ($\varepsilon_{\parallel}$) และตั้งฉาก ($\varepsilon_{\perp}$) ของวัสดุประเภทอภิวัดแบบแท่งนาโน แท่งโลหะนาโนในช่องว่างของไดอิเล็กตริกหาได้จากสภาพยอมทางไฟฟ้าของ (ε_m) และ (ε_d) ตามลำดับ ต่อมาหาเปอร์เซ็นต์ของโลหะในแท่งโลหะนาโน (fill fraction) ในช่องว่างของวัสดุได้โดยนำพื้นที่ของแท่งโลหะนาโนมาหารด้วยพื้นที่ของพื้นที่ทั้งหมดเป็นดั่งสมการ

$$f = \frac{a}{A} \quad (2.73)$$

เมื่อ a คือ พื้นที่ภาคตัดขวางของแท่งโลหะนาโนหนึ่งแท่ง

A คือ พื้นที่ทั้งหมดของโครงสร้างของรูปหกเหลี่ยม (hexagon)

สภาพยอมทางไฟฟ้าประสิทธิผลในทิศขนาน (effective parallel permittivity) การพิจารณาสำหรับองค์ประกอบในแนวนอนของเทรนเซอร์สภาพยอมทางไฟฟ้าของแท่งนาโน เริ่มจากการวิเคราะห์สมการคลื่นของชเรอดิงเงอร์ (Schrodinger) ที่มีฟังก์ชันขึ้นกับระยะรัศมีจากจุดศูนย์กลางของแท่งนาโน (r) และมีระยะทาง (R) เมื่อทราบเปอร์เซ็นต์ของแท่งโลหะนาโนในช่องว่างไดอิเล็กตริก หาได้จากศักย์ไฟฟ้าภายในแท่งโลหะนาโนคือ ψ_1 และศักย์ไฟฟ้าของช่องว่างไดอิเล็กตริกคือ ψ_2 ข้อจำกัดของศักย์ไฟฟ้ามีขอบเขตจากเงื่อนไขขอบเขต ดังนี้

$$\psi_1|_{r=R} = \psi_2|_{r=R} \quad (2.74)$$

$$|\psi_1(r=0)| < +\infty \quad (2.75)$$

$$|\psi_2(r \rightarrow \infty)| = -E_0 r \cos \theta \quad (2.76)$$

$$\varepsilon_1 \frac{d\psi_1}{dr} \Big|_{r=R} = \varepsilon_2 \frac{d\psi_2}{dr} \Big|_{r=R} \quad (2.77)$$

โดย ε_1 และ ε_2 คือสภาพยอมทางไฟฟ้าภายในแท่งโลหะนาโนและช่องว่างของไดอิเล็กตริก ตามลำดับ เราสามารถแก้ปัญหของ ψ โดยใช้ trigonometric series expansion สำหรับค่าบของศักย์ไฟฟ้า

$$\psi = A \ln r + K + \sum_{n=1}^{\infty} r^n (A_n \sin n\theta + B_n \cos n\theta) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{r^n} (C_n \sin n\theta + D_n \cos n\theta) \quad (2.78)$$

โดยใช้เงื่อนไขในสมการเงื่อนไขขอบเขต เราจะประมาณหาฟังก์ชันของศักย์ไฟฟ้าภายในแท่งโลหะนาโน ψ_1 และภายนอกแท่งโลหะนาโน ψ_2 (Yao et al., 2011) ได้ดังนี้

$$\psi_1 = K_1 + \sum_{n=1}^{\infty} r^n (A_n \sin n\theta + B_n \cos n\theta) \quad (2.79)$$

$$\psi_2 = K_2 - E_0 r \cos \theta + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{r^n} (C_n \sin n\theta + D_n \cos n\theta) \quad (2.80)$$

โดยไม่สนใจเทอมของ $\frac{1}{r^n}$ ใน ψ_1 และแทนที่เทอมของ r^n ใน ψ_2 ที่มีข้อจำกัดของศักย์ไฟฟ้าที่ $\psi_2 \rightarrow \infty = -E_0 r \cos \theta$ สิ่งที่มีนัยสำคัญคือการแก้ปัญหที่ไม่สิ้นสุดสำหรับศักย์ไฟฟ้าค่าทั้งหมดของ r ต่อมากำหนดค่าคงที่ K_1 และ K_2 ในสมการให้เท่ากับ 0 สามารถใช้เงื่อนไขขอบเขตสำหรับบริเวณที่เกิดการซ้อนทับกันระหว่างแท่งนาโนและช่องว่างของไดอิเล็กตริกที่ R ของศักย์ไฟฟ้าภายในแท่ง

นาโน (ψ_1) และภายนอกแท่งนาโน (ψ_2) เนื่องจากเอกลักษณ์ของอนุกรมตรีโกณมิติ สามารถเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันตรีโกณมิติสำหรับแสดงที่ขอบเขต ดังสมการ

$$A_n R^n = \frac{C_n}{R^n} \quad (2.81)$$

$$B_n R^n = \frac{D_n}{R^n} \quad (2.82)$$

$$RB_1 = \frac{D_1}{R} - E_0 R \quad (2.83)$$

เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ เมื่อ $n = 1$ นอกจากนี้ยังสามารถเขียนนิพจน์สำหรับเงื่อนไขขอบเขตที่สองของเราที่กำหนดไว้ในสมการ (2.79) และสมการ (2.80) ลงในสมการ (2.77) ได้ดังนี้

$$\varepsilon_1 \sum_{n=1}^{\infty} A_n n R^{n-1} (A_n \sin n\theta + B_n \cos n\theta) = -\varepsilon_2 E_0 \cos \theta - \varepsilon_2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{R^{n+1}} (C_n \sin n\theta + D_n \cos n\theta) \quad (2.84)$$

สามารถเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันตรีโกณมิติที่กำหนดโดยสมการ (2.84) เพื่อให้ได้สมการความสัมพันธ์ขึ้น 3 สมการดังนี้

$$\varepsilon_1 n A_n R^{n-1} = \varepsilon_2 \frac{-n}{R^{n-1}} C_n \quad (2.85)$$

$$\varepsilon_1 n B_n R^{n-1} = \varepsilon_2 \frac{-n}{R^{n-1}} D_n \quad (2.86)$$

$$\varepsilon_1 B_1 = -\varepsilon_2 E_0 - \varepsilon_2 \frac{D_1}{R^2} \quad (2.87)$$

กำหนดให้ $A_n = B_n = C_n = D_n = 0$ เพราะเมื่อเงื่อนไขขอบเขตไม่เป็นไปได้ อย่างไรก็ตามสามารถใช้สมการ (2.83) และสมการ (2.87) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ D_1 และ B_1 ผ่านการแทนค่า

$$D_1 = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} R^2 E_0 \quad (2.88)$$

$$B_1 = \frac{-2\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} E_0 \quad (2.89)$$

สมการนี้แสดงถึง B_1 ซึ่งสามารถนำไปแทนที่ลงในการแสดงสำหรับ ψ_1 ที่ $n = 1$

$$\psi_1 = \frac{-2\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} E_0 R \cos \theta \quad (2.90)$$

สมการนี้แสดงถึงศักย์ไฟฟ้าภายในเทอมของสนามไฟฟ้าภายนอกของแท่งนาโน ($E_0 = E_{out}$)

สามารถหาอนุพันธ์สมการนี้ที่คาดว่าคือ R ที่แสดงสำหรับสนามไฟฟ้าภายในแท่งโลหะ (E_{in})

$$-\frac{\partial(\psi_1)}{\partial R} = E_{in} = \frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} E_{out} \quad (2.91)$$

ความสัมพันธ์ของสมบัติที่เท่ากันทุกทิศทาง (isotropic) สำหรับสภาพยอมทางไฟฟ้าในแนวนอน ($\epsilon_{\parallel}$) กับวัสดุที่มีตัวกลางต่างกัน 2 ตัวกลางได้เป็น

$$\epsilon_{\parallel} = \frac{f \epsilon_1 E_{in} + (1-f) \epsilon_2 E_{out}}{f E_{in} + (1-f) E_{out}} \quad (2.92)$$

สามารถแทนค่าสำหรับ E_{in} ลงในสมการนี้ และต่อไปทำให้ $\epsilon_1 = \epsilon_m$ และ $\epsilon_2 = \epsilon_d$ สอดคล้องกับค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของแท่งโลหะนาโนและช่องว่างในไดอิเล็กตริกตามลำดับ เมื่อทำการแทนค่าเพื่อแสดงสำหรับองค์ประกอบในแนวนอนของเทนเซอร์สภาพยอมทางไฟฟ้า ($\epsilon_{\parallel}$) ในเทอมของเปอร์เซ็นต์ของแท่งโลหะนาโน (f) และสภาพยอมทางไฟฟ้าของแท่งโลหะนาโน (ϵ_m) และช่องว่างในไดอิเล็กตริก (ϵ_d)

$$\epsilon_{\parallel} = \frac{(1+f) \epsilon_m \epsilon_d + (1-f) \epsilon_d^2}{(1+f) \epsilon_d + (1-f) \epsilon_m} \quad (2.93)$$

สภาพยอมทางไฟฟ้าประสิทธิภาพในทิศตั้งฉาก (effective perpendicular permittivity) สภาพยอมทางไฟฟ้าในแนวตั้งฉากจากสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell) และทำโดยใช้เงื่อนไขขอบเขตของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า ($\vec{E}^{\perp}$) ไปตามความยาวของแท่งโลหะนาโนอย่างต่อเนื่องที่ขอบเขตระหว่างแท่งโลหะนาโนและช่องว่างในไดอิเล็กตริก

$$\vec{E}_1^{\perp} = \vec{E}_2^{\perp} = \vec{E}^{\perp} \quad (2.94)$$

เมื่อ $\vec{E}_1^{\perp}$ คือ สนามไฟฟ้าแนวตั้งฉากในแท่งโลหะนาโน

$\vec{E}_2^{\perp}$ คือ สนามไฟฟ้าแนวตั้งฉากในช่องว่างในไดอิเล็กตริก

$\vec{E}^{\perp}$ คือ สนามประสิทธิภาพแนวตั้งฉากสำหรับอภิวัดแบบแท่งนาโนที่ความยาวคลื่นน้อย ๆ มาจากสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell equation) ที่มีการกระจายของสนามในทิศทางตั้งฉากสามารถหาได้โดย $\vec{D}^{\perp} = \epsilon_{\perp} \vec{E}^{\perp}$ สามารถกำหนดสนามกระจายประสิทธิภาพแนวตั้งฉากโดยค่าเฉลี่ยของสนามกระจายของแท่งโลหะนาโนและช่องว่างในไดอิเล็กตริกโดยใช้เปอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะ (f)

$$\vec{D}^{\perp} = f \vec{D}_1^{\perp} + (1-f) \vec{D}_2^{\perp} \quad (2.95)$$

เมื่อ $\vec{D}_1^{\perp} = \epsilon_m \vec{E}_1^{\perp}$ และ $\vec{D}_2^{\perp} = \epsilon_d \vec{E}_2^{\perp}$ แสดงถึงสนามกระจายของแท่งโลหะนาโนและช่องว่างในไดอิเล็กตริกตามลำดับ องค์ประกอบของสภาพยอมทางไฟฟ้าแนวตั้งฉากสำหรับอภิวัดแบบแท่งโลหะนาโน

$$\epsilon_{\perp} = f \epsilon_m + (1-f) \epsilon_d \quad (2.96)$$

รูปแบบโครงสร้างของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลที่ทำการศึกษา มีดังนี้

1) โครงสร้างแบบวางตัวซ้อนทับกันเป็นชั้น ๆ

พารามิเตอร์ประสิทธิภาพในข้อจำกัดของความหนาของชั้นที่อนันต์สำหรับโครงสร้างแบบวางตัวซ้อนทับกันเป็นชั้น ๆ ที่ขนานกับระนาบ $\hat{x}$ และ $\hat{y}$ แต่เดิมถูกเขียนโดยรยทอยย์ (Rytov) และภายหลังวูดด์ (Wood) และคณะ ได้นำมาใช้ใหม่สำหรับ characteristic matrix คือ

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = f \varepsilon_m + (1-f) \varepsilon_d \quad (2.97)$$

$$\varepsilon_{zz} = \left(\frac{f}{\varepsilon_m} + \frac{1-f}{\varepsilon_d} \right)^{-1} \quad (2.98)$$

เมื่อ The filling ratio คือ เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรโลหะในโครงสร้างแบบวางตัวซ้อนทับกันเป็นชั้น ๆ โดย $f = t_m / (t_m + t_d)$

t_d คือ ความหนาของชั้นไดอิเล็กตริก

t_m คือ ความหนาของชั้นโลหะ

ε_d คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก

ε_m คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของเงิน

2) โครงสร้างแบบแท่งนาโน

ในการกำหนดพารามิเตอร์ของทฤษฎีตัวกลางประสิทธิภาพสำหรับตัวกลางที่มีโครงสร้างแบบแท่งนาโน ไม่ได้เป็นเรื่องง่ายเหมือนกับกรณีของโครงสร้างแบบวางตัวซ้อนทับกันเป็นชั้น ๆ เนื่องจากการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันขึ้นอยู่กับช่วงความถี่ที่น่าสนใจ ไม่สามารถข้ามเรื่องการกระจายตัวของพื้นที่และจะนำไปสู่รูปแบบโครงสร้างที่ความถี่เดียวกันที่ไม่เป็นไฮเพอร์โบลิก ยกเว้นในช่วงกว้างทางแสงซึ่งจะลดลงด้วยการเหนี่ยวนำการเคลื่อนที่และการสูญเสียจากส่วนประกอบของโลหะ การวางตำแหน่งตามแนวแกน $\hat{z}$ เป็นแบบขนานไปกับแท่งโลหะ เทนเซอร์ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าประสิทธิภาพลอยู่ในรูปแบบ

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \frac{[(1+f)\varepsilon_m + (1-f)\varepsilon_d]\varepsilon_d}{(1-f)\varepsilon_m + (1+f)\varepsilon_d} \quad (2.99)$$

$$\varepsilon_{zz} = f\varepsilon_m + (1-f)\varepsilon_d \quad (2.100)$$

เมื่อ The filling ratio คือ เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรความเป็นโลหะในโครงสร้างผลึกแบบแท่งโลหะนาโน

โดยที่ค่าเปอร์เซ็นต์ของปริมาตรความเป็นโลหะมีค่าเป็น $f = \pi D^2 / 4p^2$

เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง (diameter)

p คือ ระยะห่างระหว่างแท่งนาโน (period)

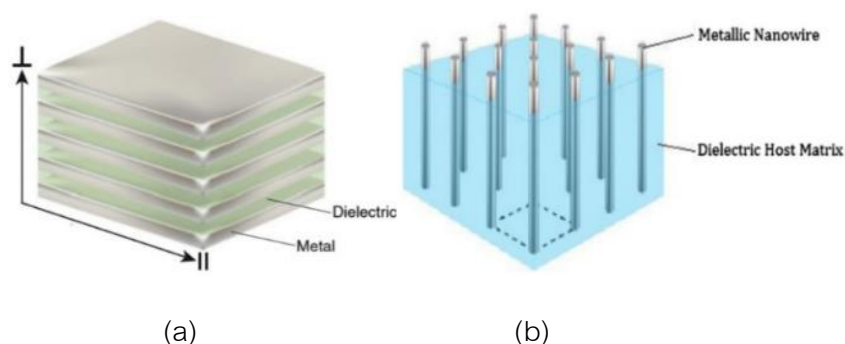
ในทิศทางแกน $\hat{x}$ และ $\hat{y}$ ของตัวกลาง สำหรับโครงสร้างอภิวัดแบบไฮเพอร์โบลิก ผลของ

ตัวกลางแบบแท่งนาโนสามารถปรับให้เข้ากับขอบเขตที่แตกต่างกันโดยการเปลี่ยนค่า ω และ p

เนื่องจากอัตราส่วนที่สูงมากส่วนใหญ่ของโครงสร้างประเภทอภิวัดแบบไฮเพอร์โบลิกแบบแท่งนาโนที่เกิดขึ้นจริงจะถูกประดิษฐ์ขึ้นโดยการทับถมกันของสสารทางเคมีไฟฟ้าของโลหะ เช่น เงิน (Ag) หรือทองคำ (Au) ภายในเทมเพลตของไดอิเล็กตริกที่มีรูพรุน การอาร์เรย์ของแท่งนาโนคาร์บอนในสถานะที่เป็นโลหะได้รับการเสนอให้เป็นทางเลือกหนึ่งของเทมเพลตแบบวางซ้อนทับกันเป็นชั้น ๆ เพราะความสามารถในการลดการกระจายตัวของพื้นที่และการควบคุมในระดับที่สูงขึ้น

5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวกลางโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล

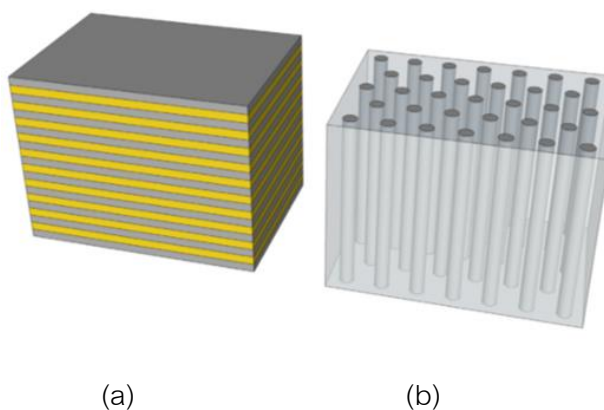
Prashant Shekhar และคณะ (Shekhar et al., 2014) ได้ทำการศึกษาตัวกลางประเภทอภิวัดเชิงวิศวกรรมในระดับนาโนเกี่ยวกับการออกแบบโครงสร้างของอภิวัดให้มีความพิเศษกว่าวัสดุที่มีอยู่ในธรรมชาติ ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบและสมบัติของอภิวัดที่มีการกระจายตัวแบบไฮเพอร์โบลิก แนวคิดทฤษฎีของตัวกลางไฮเพอร์โบลิก และรวมถึงการนำเสนอการประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ โดยวัสดุที่ใช้ออกแบบโครงสร้างมีองค์ประกอบของชั้นโลหะและชั้นไดอิเล็กตริก คือ เงิน (Ag) และไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ตามลำดับ มีแนวการวางตัวของโครงสร้างดังต่อไปนี้ 1) โครงสร้างฟิล์มบาง (thin film) ที่มีลักษณะของการวางเรียงตัวแบบวางซ้อนทับกันหลายชั้นเป็นคาบแสดงดังภาพประกอบ 9(a) และ 2) โครงสร้างแบบแท่งนาโน (nanowire) ที่ประกอบด้วยแท่งโลหะนาโนฝังตัวอยู่ในสารไดอิเล็กตริกแสดงดังภาพประกอบ 9(b) ซึ่งโครงสร้างแบบฟิล์มบางและแบบแท่งนาโนนี้สามารถพิจารณาสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุด้วยทฤษฎีของตัวกลางประสิทธิผลที่ประกอบด้วยสภาพยอมทางไฟฟ้าประสิทธิผลในทิศแนวนอนและแนวตั้งฉาก



ภาพประกอบ 9 แสดงโครงสร้างอภิวัดแบบไฮเพอร์โบลิก (a) แบบฟิล์มบางวางซ้อนทับกัน และ (b) แบบแท่งนาโน

ที่มา: Hyperbolic metamaterials: fundamentals and applications | Nano Convergence | Full Text (springeropen.com)

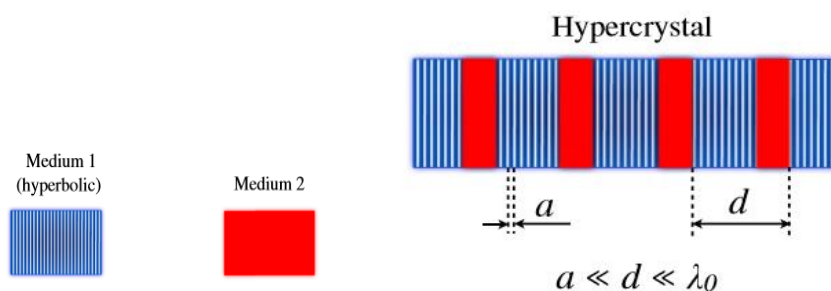
Lorenzo Ferrari และคณะ (Ferrari et al., 2015) ได้ศึกษาเกี่ยวกับแนวคิด ทฤษฎี การออกแบบวัสดุประเภทอภิวัดแบบไฮเพอร์โบลิก โดยโครงสร้างประกอบไปด้วยชั้นโลหะและชั้นไดอิเล็กตริก คือ เงิน (Ag) และซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ตามลำดับ แนวการวางตัวของโครงสร้างดังต่อไปนี้ 1) โครงสร้างฟิล์มบาง (thin film) ที่มีลักษณะของการวางเรียงตัวแบบวางซ้อนทับกันหลายชั้นเป็นคาบ และ 2) โครงสร้างแบบแท่งนาโน (nanowire) ที่ประกอบด้วยแท่งโลหะนาโนฝังตัวอยู่ในสารไดอิเล็กตริก ลักษณะของโครงสร้างแสดงดังภาพประกอบ 10(a) และ 10(b) ตามลำดับ รวมถึงการนำอภิวัดแบบไฮเพอร์โบลิกมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น ด้านการประดิษฐ์เลนส์สมบรูณ์แบบ (hyperlens) โดยพิจารณาจากการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าภายในโครงสร้าง เนื่องจากภายในโครงสร้างเกิดการกระตุ้นทำให้เกิดการสั่นของอิเล็กตรอนที่สะสมอยู่ตรงพื้นผิวโลหะที่สัมผัสกับไดอิเล็กตริก ในงานวิจัยนี้ได้สนใจวิเคราะห์ในย่านความถี่อัลตราไวโอเลต (ultraviolet) แสงที่ตามองเห็น (visible) อินฟราเรดคลื่นสั้น (near-infrared) และอินฟราเรดคลื่นกลาง (mid-infrared)



ภาพประกอบ 10 แสดงโครงสร้างอวิวัสดุแบบไฮเพอร์โบลิก (a) แบบวางซ้อนกันเป็นชั้น ๆ (b) แบบแท่งโลหะนาโน

ที่มา: Hyperbolic metamaterials and their applications - ScienceDirect

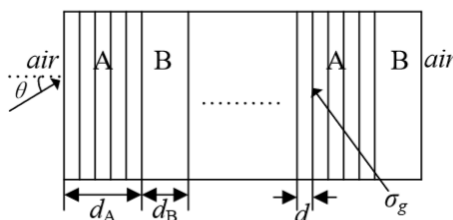
Evgenii E. Narimanov (Narimanov, 2014) ทำการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลที่สร้างมาจากวัสดุประเภทอวิวัสดุแบบไฮเพอร์โบลิกมาวางเรียงตัวกันเป็นคาบอย่างต่อเนื่อง โดยตัวโครงสร้างในการออกแบบขึ้นอยู่กับสภาพยอมทางไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นมาก ๆ คลื่นที่บริเวณพื้นผิวนำเสนอโดยกระบวนการไฮเพอร์คริสตัลที่มีสมบัติของทั้งสถานะทางแสงของทอม (Tamm) ในโฟโตนิกคริสตัลและการโพลาไรเซชันของพื้นผิวพลาสมอน (Surface-plasmon polaritons) ที่ระหว่างชั้นโลหะและชั้นไดอิเล็กตริก โดยคาบต้องน้อยกว่าความยาวคลื่นมาก ๆ ($d \ll \lambda_0$) องค์ประกอบของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลมีดังนี้ ชั้นที่ 1 สร้างจากอวิวัสดุแบบไฮเพอร์โบลิกที่ประกอบจาก 2 ส่วนได้แก่ ส่วนที่เป็นโลหะคือ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ และส่วนที่เป็นไดอิเล็กตริกคือ $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ และชั้นที่ 2 สร้างมาจากวัสดุไดอิเล็กตริกคือ $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ เปอร์เซ็นต์ปริมาตรของโลหะในโครงสร้างไดอิเล็กตริกมีค่า 0.25 ดังภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 แสดงโครงสร้างของวัสดุโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลชั้น 1 คืออภิวัดแบบไฮเพอร์โบลิค และชั้นที่ 2 คือไดอิเล็กตริก

ที่มา: Phys. Rev. X 4, 041014 (2014) - Photonic Hypercrystals (aps.org)

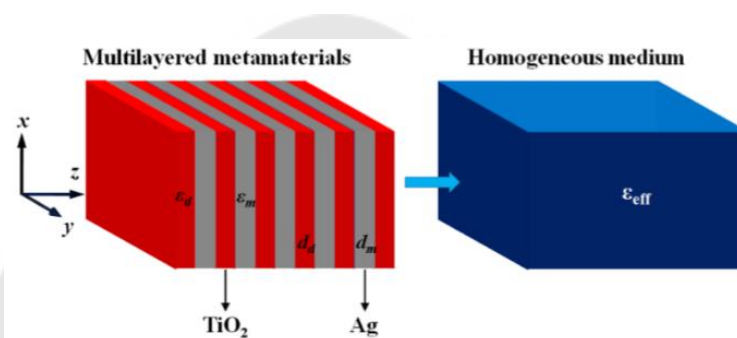
Huimin Fang และคณะ (Fang et al., 2017) ได้ศึกษาและออกแบบโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล โครงสร้างประกอบไปด้วยชั้นโลหะและชั้นไดอิเล็กตริก คือ แผ่นแกรฟีน (Graphene) และซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ตามลำดับ แนวการวางตัวของโครงสร้างองค์ประกอบของชั้นที่ 1 คือไดอิเล็กตริกมีความหนาเท่ากับ 2 ไมโครเมตร และชั้นที่ 2 คือแผ่นแกรฟีน (Graphene) ที่ฝังอยู่ในไดอิเล็กตริก มีความหนาเท่ากับ 6 ไมโครเมตร ดังภาพประกอบ 12 การคำนวณผลแสดงให้เห็นถึงความกว้างของแถบช่องว่างที่ความถี่ต่ำลดลงจากคาบของโครงสร้างสภาพยอมทางไฟฟ้าของชั้นของไดอิเล็กตริก ความหนาของชั้นไดอิเล็กตริก เปอร์เซ็นต์ปริมาตรของโลหะในชั้นของไดอิเล็กตริก และจำนวนคาบของโครงสร้างตัวกลางที่มีการวางตัวแบบซ้อนทับกันเป็นชั้น ๆ ของแกรฟีนและไดอิเล็กตริกที่เพิ่มขึ้น



ภาพประกอบ 12 แสดงโครงสร้างของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลชั้น A คืออภิวัดแบบไฮเพอร์โบลิค และชั้น B คือไดอิเล็กตริก

ที่ ม ๑ : Photonic Bandgap Properties of One-Dimensional Graphene-Based Photonic Crystals with a Single Dielectric - IOPscience

สุรุฒิ วิจารย์ และประธาน บุณศิริ (Wicharn & Buranasiri, 2018) ได้ศึกษา phase-matched third-harmonic (TH) จากโครงสร้างอภิวัดแบบวางซ้อนกันเป็นชั้น ๆ ดังภาพประกอบ 13 โดยนำเสนอเกี่ยวกับการกระจายตัวเชิงวิศวกรรมของวัสดุชนิดอภิวัดที่มีการกระจายตัวแบบไฮเพอร์โบลิก เช่น วัสดุที่มีสมบัติเชิงแสงไม่เท่ากันทุกทิศทาง (anisotropic) มีกระบวนการของสภาพยอมทางไฟฟ้าของไดอิเล็กตริกที่เป็นบวกและเป็นลบ เพื่อศึกษาหาสัมประสิทธิ์ของการส่งผ่านและการสะท้อนของ phase-matched third-harmonic ที่เป็นฟังก์ชันของมุมตกกระทบและความเข้มของความถี่ที่ป้อนเข้าไป พบว่าประสิทธิภาพสูงสุดได้มาจากมุมตกกระทบที่สูง



ภาพประกอบ 13 แสดงโครงสร้างอภิวัดแบบวางตัวเรียงซ้อนทับกันเป็นชั้น ๆ

ที่ ม า : Quasibirefringent phase-matching technique for third-harmonic pulse generation from multilayered metamaterials (spiedigitallibrary.org)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

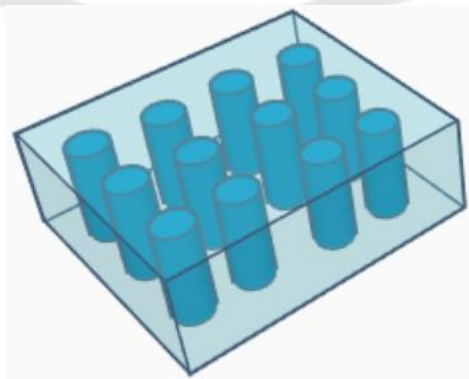
ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

1. การออกแบบโครงสร้างของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลที่จะศึกษา
2. การออกแบบและพัฒนาโปรแกรมคำนวณด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน
3. ขั้นตอนการศึกษาผลการคำนวณของโปรแกรมสำหรับงานวิจัยนี้
4. ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการดูดกลืนของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล

1. การออกแบบโครงสร้างของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลที่จะศึกษา

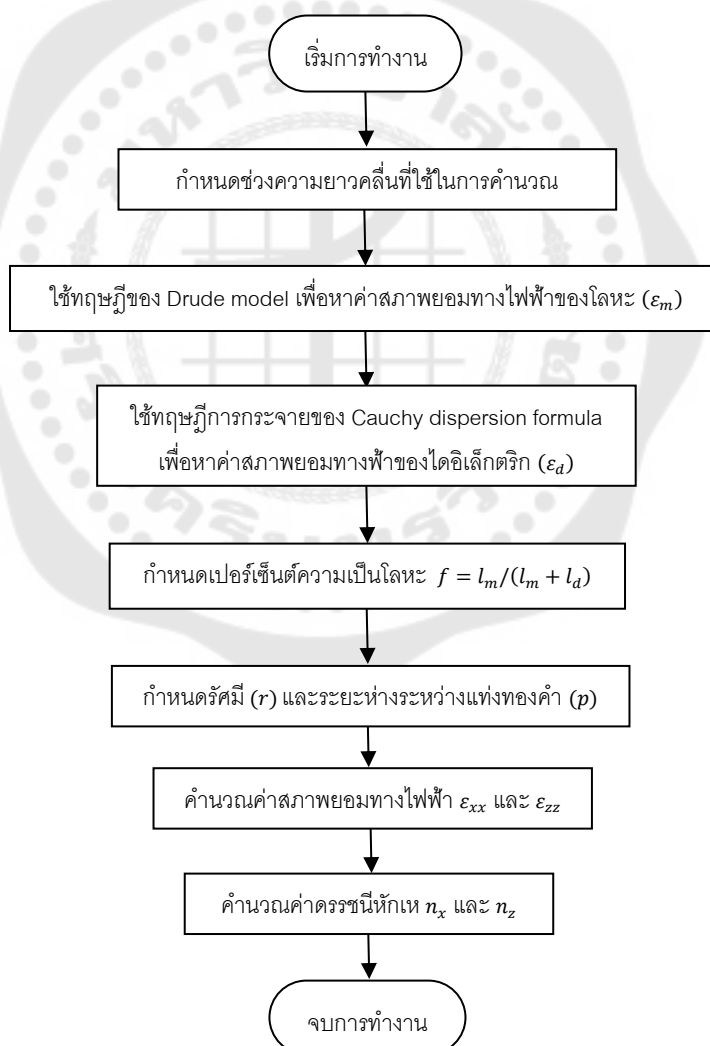
ในหัวข้อนี้นำเสนอการออกแบบโครงสร้างจำลองของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล โดยโครงสร้างดังกล่าวประกอบด้วยการจัดเรียงตัวแบบเป็นคาบในหนึ่งมิติของชั้นอภิวัดแบบไฮเพอร์โบลิก และชั้นวัสดุสารไดอิเล็กตริก เพื่อเพิ่มค่าการดูดกลืนแสงให้สูงขึ้นกว่ากรณีของอภิวัดแบบไฮเพอร์โบลิกชั้นเดียว โดยขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลมีดังต่อไปนี้

1) ออกแบบส่วนประกอบของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลขั้นที่ 1 ได้แก่ อภิวัดแบบไฮเพอร์โบลิก ซึ่งถูกสร้างมาจากการจัดเรียงตัวแบบเป็นคาบในสองมิติของแท่งนาโนทองคำในอินเดียมทินออกไซด์ และมีความหนาเท่ากับ l_1 โดยมีตัวประกอบสัดส่วนปริมาตรของโลหะในไดอิเล็กตริกเท่ากับ $f = \pi D^2 / 4p^2$ โดยลักษณะของแบบจำลองโครงสร้างของชั้นอภิวัดแบบไฮเพอร์โบลิกถูกแสดงดังภาพประกอบ 14



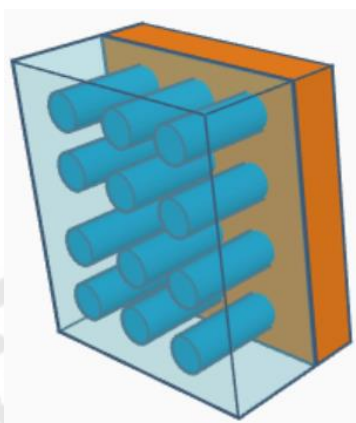
ภาพประกอบ 14 แสดงแบบจำลองของอภิวัดแบบไฮเพอร์โบลิก

การจัดเรียงตัวแบบเป็นคาบในสองมิติของแท่งนาโนทองคำในอินเดียมทินออกไซด์จะทำให้โครงสร้างดังกล่าวสภาพยอมทางไฟฟ้าแบบแอนไอโซทรอปิก ได้แก่ $\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} \neq \epsilon_{zz}$ และส่งผลให้องค์ประกอบของดรรชนีหักเหของอวิวัตต์แบบไฮเพอร์โบลิกในแนวแกน $\hat{x}$ และแกน $\hat{z}$ มีค่าแตกต่างกัน โดยค่าของดรรชนีหักเหของชั้นอวิวัตต์แบบไฮเพอร์โบลิกในแต่ละแกนที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ สามารถถูกคำนวณได้จากทฤษฎีตัวกลางประสิทธิผลดังรายละเอียดในหัวข้อ 2.3 โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณหาค่าดรรชนีหักเหของอวิวัตต์แบบไฮเพอร์โบลิกมีแผนผังการทำงานดังแสดงดังภาพประกอบ 15 ผลการคำนวณจะแสดงสเปกตรัมของค่าดรรชนีหักเหในแนวแกน $\hat{x}$ และแกน $\hat{z}$ ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ สำหรับชั้นอวิวัตต์แบบไฮเพอร์โบลิกที่ถูกออกแบบอย่างเหมาะสมใด ๆ



ภาพประกอบ 15 แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการตรวจสอบสมบัติของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล

2) ออกแบบส่วนประกอบของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลชั้นที่ 2 ซึ่งในการศึกษานี้เลือกใช้อินเดียมทินออกไซด์ (ITO) ที่มีความหนาเท่ากับ I_2 และเมื่อนำมาจัดเรียงแบบเป็นคาบในหนึ่งมิติร่วมกับอภิวัสดุแบบไฮเพอร์โบลิกในชั้นแรก ทำให้ได้ลักษณะโครงสร้างของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลดังแสดงในภาพประกอบ 16



ภาพประกอบ 16 แสดงแบบจำลองของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลที่มีการจัดเรียงตัวแบบเป็นคาบของอภิวัสดุแบบไฮเพอร์โบลิกในชั้นที่ 1 และวัสดุอินเดียมทินออกไซด์ในชั้นที่ 2

2. การออกแบบและพัฒนาโปรแกรมคำนวณด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน

แผนผังการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์และลำดับขั้นตอนในการคำนวณค่าการดูดกลืนแสงของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์โบลิกคริสตัลด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอนถูกแสดงในภาพประกอบ 17 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมเริ่มต้นจากการกำหนดค่าคงที่ของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่จำเป็น ได้แก่ ช่วงความยาวคลื่นที่สนใจศึกษา ค่าดัชนีหักเหของชั้นอภิวัสดุแบบไฮเพอร์โบลิกและชั้นไดอิเล็กตริก ความหนาของชั้นอภิวัสดุแบบไฮเพอร์โบลิกและชั้นไดอิเล็กตริก มุมตกกระทบของแสง และจำนวนคาบของโครงสร้าง เมื่อโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้รับการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะทำการสร้างเมทริกซ์ถ่ายโอนของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลแต่ละคาบ โดยจะวนซ้ำการคำนวณเมทริกซ์ถ่ายโอนตามจำนวนคาบของโครงสร้างที่กำหนดขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้ คือ เมทริกซ์ถ่ายโอนของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลทั้งหมด และในท้ายที่สุดโปรแกรมจะนำสมาชิกของเมทริกซ์ถ่ายโอนไปคำนวณค่าสเปกตรัมของการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ตามสมการ (2.54) ในรูปแบบสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลที่มีเงื่อนไขต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในบทที่ 4

3. ขั้นตอนการศึกษาผลการคำนวณของโปรแกรมสำหรับงานวิจัยนี้

โครงสร้างของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลมีองค์ประกอบจำนวน 2 ชั้น โดยชั้นแรกเกิดจากอภิวัสดุแบบไฮเพอร์โบลิกของแท่งนาโนทองคำ (Johnson & Christy, 1972b) ในอินเดียมทินออกไซด์ (Au + ITO) และชั้นต่อมาเกิดจากอินเดียมทินออกไซด์ (Moerland & Hoogenboom, 2016) ซึ่งมีดรรชนีหักเหเป็น $n_1 = 2.3287 - 0.0142i$ และ $n_2 = 1.84 - 0.003i$ ตามลำดับ ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการดูดกลืนของโครงสร้าง ดังนี้

1) กำหนดย่านความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการพิจารณาเป็นช่วง 500-1,000 นาโนเมตร

2) กำหนดความหนาของชั้น Au + ITO (I_1) และชั้น ITO (I_2), ตัวประกอบสัดส่วนปริมาตรของโลหะในไดอิเล็กตริก (f), จำนวนคาบของโครงสร้าง (N) และมุมตกกระทบของแสงเมื่อเทียบกับเส้นปกติ (θ) ของโครงสร้างตามตารางต่อไปนี้

ตาราง 3 แสดงพารามิเตอร์ความหนาของอภิวัสดุแบบไฮเพอร์โบลิก (I_1) และชั้นอินเดียมทินออกไซด์ (I_2) ของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล

โครงสร้างแบบที่	I_1 (นาโนเมตร)	I_2 (นาโนเมตร)
1	300	100
2	300	130
3	300	160
4	300	190
5	300	220
6	300	250

ตาราง 4 แสดงพารามิเตอร์สัดส่วนของเปอร์เซ็นต์ปริมาตรความเป็นโลหะในไดอิเล็กตริก (f) ของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล

โครงสร้างแบบที่	l_1 (นาโนเมตร)	l_2 (นาโนเมตร)	f
1	300	190	0.25
2	300	190	0.35
3	300	190	0.45
4	300	190	0.55
5	300	190	0.65
6	300	190	0.75
7	300	190	0.85

ตาราง 5 แสดงพารามิเตอร์จำนวนคาบของโครงสร้างมีค่าต่าง ๆ (N) ของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล

โครงสร้างแบบที่	l_1 (นาโนเมตร)	l_2 (นาโนเมตร)	f	N
1	300	190	0.55	5
2	300	190	0.55	10
3	300	190	0.55	20
4	300	190	0.55	30
5	300	190	0.55	40
6	300	190	0.55	50
7	300	190	0.55	70
8	300	190	0.55	90

ตาราง 6 แสดงพารามิเตอร์มุมตกกระทบของแสง (θ) ของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล

โครงสร้างแบบที่	l_1 (นาโนเมตร)	l_2 (นาโนเมตร)	f	N	θ°
1	300	190	0.55	50	0
2	300	190	0.55	50	10
3	300	190	0.55	50	20
4	300	190	0.55	50	30
5	300	190	0.55	50	40
6	300	190	0.55	50	50
7	300	190	0.55	50	60
8	300	190	0.55	50	70
9	300	190	0.55	50	80
10	300	190	0.55	50	90

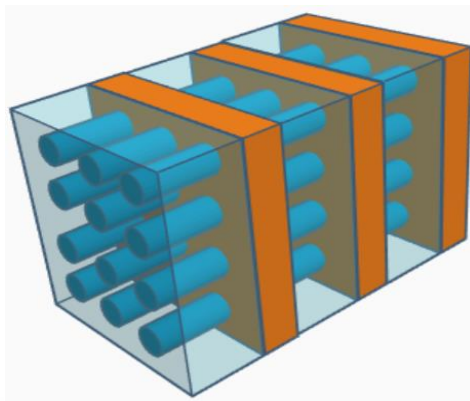
3) กำหนดวัสดุของฐานรองอากาศมีค่าดัชนีหักเห (n_{air}) เป็น 1.00 และวัสดุฐานรองทองคำมีค่าดัชนีหักเห (n_{Au}) เป็น 0.13

4) แทนค่าคงที่ต่าง ๆ ที่กำหนดลงในโปรแกรมเพื่อคำนวณและวาดกราฟสเปกตรัมการดูดกลืนของโครงสร้าง

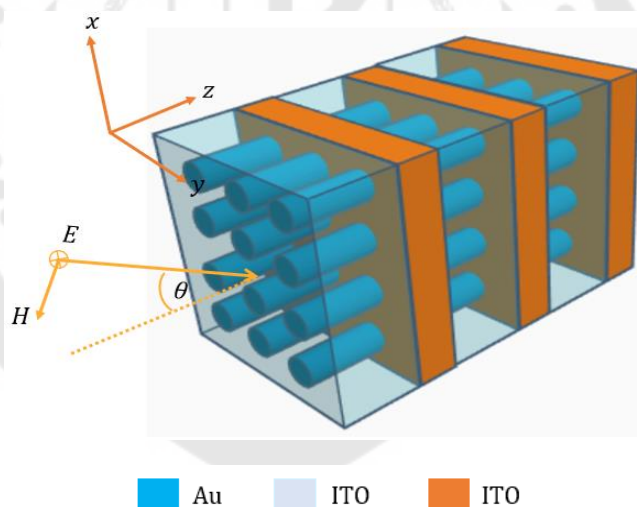
4. ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการดูดกลืนของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล

การศึกษาสมบัติการดูดกลืนของแบบจำลองโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลจะมีเงื่อนไขของโครงสร้างที่แตกต่างกัน โดยเงื่อนไขโครงสร้างที่นำมาศึกษานี้มีผลต่อสมบัติการดูดกลืนของโครงสร้างเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงไป การวางตัวของโครงสร้างหลายชั้นแบบเป็นคาบในหนึ่งมิติ โดยชั้นที่ 1 เป็นอวิวดูแบบไฮเพอร์โบลิก และชั้นที่ 2 เป็นอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) เงื่อนไขของโครงสร้างที่นำมาศึกษา ได้แก่ ความหนาของชั้นอินเดียมทินออกไซด์ (l_2) ตัวประกอบสัดส่วนปริมาตรของโลหะในไดอิเล็กตริกของโครงสร้าง (f) จำนวนคาบของโครงสร้าง (N) มุมตกกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อเทียบกับเส้นปกติ (θ) ความยาวคลื่นที่ตกกระทบ (λ) รวมถึงการศึกษานามไฟฟ้าในโครงสร้างผลึกโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล โดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงความหนา

ของชั้นอวิวัสดุแบบไฮเพอร์โบลิก (I_1) ลักษณะโครงสร้างของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลแบบใด ๆ ถูกแสดงดังภาพประกอบ 18



ภาพประกอบ 18 แสดงแบบจำลองของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลเรียงต่อกันเป็นคาบหลายชั้น โดยแบบจำลองแสดงทิศทางการตกกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล จะมีลักษณะดังภาพประกอบ 19



ภาพประกอบ 19 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล

4.1 ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อจำนวนคาบ $N = 1$ และค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะมีค่าแตกต่างกัน คือ 0.35, 0.55 และ 0.75

- 1) กำหนดความหนาของชั้นอวิวัสดุแบบไฮเพอร์โบลิก (I_1) มีค่าเป็น 300 นาโนเมตร
- 2) กำหนดความหนาของชั้นอินเดียมทินออกไซด์ (I_2) มีค่าเป็น 190 นาโนเมตร
- 3) กำหนดวัสดุของฐานรองเป็นอากาศ มีค่าดัชนีหักเห (n_{air}) เป็น 1.00

4) กำหนดตัวประกอบสัดส่วนปริมาตรของโลหะในไดอิเล็กตริก (f) มีค่าเป็น 0.35, 0.55 และ 0.75 ตามลำดับ

5) กำหนดจำนวนคาบของโครงสร้าง (N) เป็น 1

6) กำหนดมุมตกกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (θ) เป็น 0 องศา

7) แทนค่าคงที่ต่าง ๆ ที่กำหนดลงในโปรแกรมเพื่อคำนวณและวาดกราฟสเปกตรัมการดูดกลืนของโครงสร้าง

4.2 ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อจำนวนคาบของโครงสร้างมีค่าต่าง ๆ

1) กำหนดความหนาของชั้นอภิวัดแบบไฮเพอร์โบลิก (l_1) มีค่าเป็น 300 นาโนเมตร

2) กำหนดความหนาของชั้นอินเดียมทินออกไซด์ (l_2) มีค่าเป็น 190 นาโนเมตร

3) กำหนดวัสดุของฐานรองเป็นอากาศ มีค่าดัชนีหักเห (n_{air}) เป็น 1.00

4) กำหนดตัวประกอบสัดส่วนปริมาตรของโลหะในไดอิเล็กตริก (f) มีค่าเป็น 0.55

5) กำหนดจำนวนคาบของโครงสร้าง (N) เป็น 5, 10, 20, 30, 40, 50, 70 และ 90 ตามลำดับ

6) กำหนดมุมตกกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (θ) เป็น 0 องศา

7) แทนค่าคงที่ต่าง ๆ ที่กำหนดลงในโปรแกรมเพื่อคำนวณและวาดกราฟสเปกตรัมการดูดกลืนของโครงสร้าง

4.3 ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อเปอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะมีค่าต่าง ๆ

1) กำหนดความหนาของชั้นอภิวัดแบบไฮเพอร์โบลิก (l_1) มีค่าเป็น 300 นาโนเมตร

2) กำหนดความหนาของชั้นอินเดียมทินออกไซด์ (l_2) มีค่าเป็น 190 นาโนเมตร

3) กำหนดวัสดุของฐานรองเป็นอากาศ มีค่าดัชนีหักเห (n_{air}) เป็น 1.00

4) กำหนดตัวประกอบสัดส่วนปริมาตรของโลหะในไดอิเล็กตริก (f) มีค่าเป็น 0.15, 0.35, 0.55 0.75 และ 0.95 ตามลำดับ

5) กำหนดจำนวนคาบของโครงสร้าง (N) เป็น 50

6) กำหนดมุมตกกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (θ) เป็น 0 องศา

7) แทนค่าคงที่ต่าง ๆ ที่กำหนดลงในโปรแกรมเพื่อคำนวณและวาดกราฟสเปกตรัมการดูดกลืนของโครงสร้าง

4.4 ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อมุมตกกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าต่าง ๆ

- 1) กำหนดความหนาของชั้นอภิวัดแบบไฮเพอร์โบลิก (I_1) มีค่าเป็น 300 นาโนเมตร
- 2) กำหนดความหนาของชั้นอินเดียมทินออกไซด์ (I_2) มีค่าเป็น 190 นาโนเมตร
- 3) กำหนดวัสดุของฐานรองเป็นอากาศ มีค่าดัชนีหักเห (n_{air}) เป็น 1.00
- 4) กำหนดตัวประกอบสัดส่วนปริมาตรของโลหะในไดอิเล็กตริก (f) มีค่าเป็น 0.55
- 5) กำหนดจำนวนคาบของโครงสร้าง (N) เป็น 50
- 6) กำหนดมุมตกกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (θ) เป็น 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 และ 90 องศา ตามลำดับ
- 7) แทนค่าคงที่ต่าง ๆ ที่กำหนดลงในโปรแกรมเพื่อคำนวณและวาดกราฟสเปกตรัมการดูดกลืนของโครงสร้าง

4.5 ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อความหนาของชั้นอินเดียมทินออกไซด์มีค่าต่าง ๆ

- 1) กำหนดความหนาของชั้นอภิวัดแบบไฮเพอร์โบลิก (I_1) มีค่าเป็น 300 นาโนเมตร
- 2) กำหนดความหนาของชั้นอินเดียมทินออกไซด์ (I_2) มีค่าเป็น 100, 130, 160, 190, 220 และ 250 นาโนเมตรตามลำดับ
- 3) กำหนดวัสดุของฐานรองเป็นอากาศ มีค่าดัชนีหักเห (n_{air}) เป็น 1.00
- 4) กำหนดตัวประกอบสัดส่วนปริมาตรของโลหะในไดอิเล็กตริก (f) มีค่าเป็น 0.55
- 5) กำหนดจำนวนคาบของโครงสร้าง (N) เป็น 50
- 6) กำหนดมุมตกกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (θ) เป็น 0 องศา
- 7) แทนค่าคงที่ต่าง ๆ ที่กำหนดลงในโปรแกรมเพื่อคำนวณและวาดกราฟสเปกตรัมการดูดกลืนของโครงสร้าง

4.6 ขั้นตอนการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อวัสดุของฐานรองเป็นวัสดุต่าง ๆ (อากาศ และทองคำ)

- 1) กำหนดความหนาของชั้นอภิวัดแบบไฮเพอร์โบลิก (I_1) มีค่าเป็น 300 นาโนเมตร
- 2) กำหนดความหนาของชั้นอินเดียมทินออกไซด์ (I_2) มีค่าเป็น 190 นาโนเมตร
- 3) กำหนดวัสดุของฐานรองเป็นอากาศและทองคำเปรียบเทียบ โดยที่ดัชนีหักเหของอากาศเป็น $n_{air} = 1.00$ และทองคำ $n_{Au} = 0.13$
- 4) กำหนดตัวประกอบสัดส่วนปริมาตรของโลหะในไดอิเล็กตริก (f) มีค่าเป็น 0.55

- 5) กำหนดจำนวนคาบของโครงสร้าง (N) เป็น 50
- 6) กำหนดมุมตกกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (θ) เป็น 0 องศา
- 7) แทนค่าคงที่ต่าง ๆ ที่กำหนดลงในโปรแกรมเพื่อคำนวณและวาดกราฟสเปกตรัม

การดูดกลืนของโครงสร้าง

4.7 ขั้นตอนการศึกษาสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ในโครงสร้างผลึกโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล

- 1) กำหนดความหนาของชั้นอภิวัดแบบไฮเพอร์โบลิก (L_1) มีค่าเป็น 300 นาโนเมตร
- 2) กำหนดความหนาของชั้นอินเดียมทินออกไซด์ (L_2) มีค่าเป็น 190 นาโนเมตร
- 3) กำหนดวัสดุของฐานรองเป็นอากาศ มีค่าดัชนีหักเห (n_{air}) เป็น 1.00
- 4) กำหนดตัวประกอบสัดส่วนปริมาตรของโลหะในไดอิเล็กตริก (f) มีค่าเป็น 0.55
- 5) กำหนดจำนวนคาบของโครงสร้าง (N) เป็น 1, 5, 30, 50, 70 และ 90
- 6) กำหนดมุมตกกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (θ) เป็น 0 องศา
- 7) เพิ่มการคำนวณสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ในโครงสร้างผลึกโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล
- 8) แทนค่าคงที่ต่าง ๆ ที่กำหนดลงในโปรแกรมเพื่อคำนวณและวาดกราฟสเปกตรัม

การดูดกลืนของโครงสร้าง

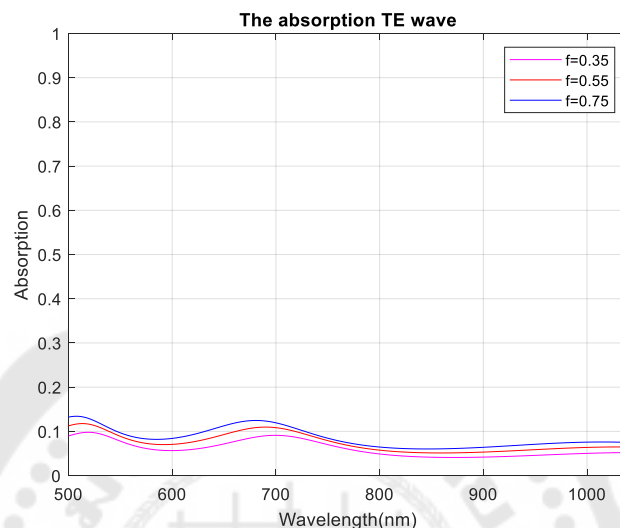
บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยเพื่อให้ได้มาซึ่งการศึกษาสมบัติการดูดกลืนของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิจัยโดยการศึกษาตามแผนการ และขั้นตอนต่าง ๆ จนกระทั่งคำนวณผลของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลที่ออกแบบและให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ได้กำหนดไว้ ได้ดังนี้

1. ผลลัพธ์ของการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อจำนวนคาบ $N = 1$ และค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะมีค่าแตกต่างกัน คือ 0.35, 0.55 และ 0.75
2. ผลลัพธ์ของการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อจำนวนคาบของโครงสร้างมีค่าแตกต่างกัน
3. ผลลัพธ์ของการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อเปอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะมีค่าแตกต่างกัน
4. ผลลัพธ์ของการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อมุมตกกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าแตกต่างกัน
5. ผลลัพธ์ของการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อความหนาของชั้นอินเดียมทินออกไซด์มีค่าแตกต่างกัน
6. ผลลัพธ์ของการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อวัสดุของฐานรองเป็นวัสดุแตกต่างกัน (อากาศ และทองคำ)
7. ผลลัพธ์ของการศึกษานามไฟฟ้าสัมพัทธ์ในโครงสร้างผลึกโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล

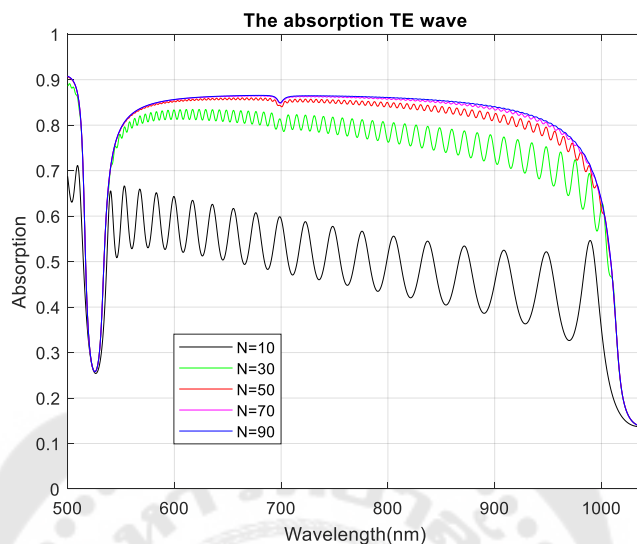
1. ผลลัพธ์ของการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อจำนวนคาบ $N = 1$ และค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะมีค่าแตกต่างกัน คือ 0.35, 0.55 และ 0.75



ภาพประกอบ 20 ผลลัพธ์ของการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อจำนวนคาบ $N = 1$ และค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะมีค่าแตกต่างกัน คือ 0.35, 0.55 และ 0.75

กราฟแสดงค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความยาวคลื่น 500 ถึง 1,000 นาโนเมตร เมื่อจำนวนคาบ $N = 1$ และค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะมีค่าแตกต่างกัน คือ ม่วง: 0.35, แดง: 0.55 และน้ำเงิน: 0.75 เมื่อแกน y แสดงสเปกตรัมการดูดกลืน และแกน x แสดงความยาวคลื่นในหน่วยนาโนเมตร พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลที่จำนวนคาบ $N = 1$ และที่เปอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะ 0.35, 0.55 และ 0.75 พบว่าผลลัพธ์ของกราฟสเปกตรัมการดูดกลืนมีค่าค่อนข้างน้อยมาก สามารถเห็นได้ชัดโดยเพิ่มเปอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะส่งผลให้กราฟค่าการดูดกลืนสูงขึ้นตามลำดับแสดงดังภาพประกอบที่ 20 เปอร์เซ็นต์ของประสิทธิภาพการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้างผลึกโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลที่จำนวนคาบ $N = 1$ อยู่ที่ประมาณ 9%-11% ซึ่งมีค่าการดูดกลืนค่อนข้างน้อยมาก

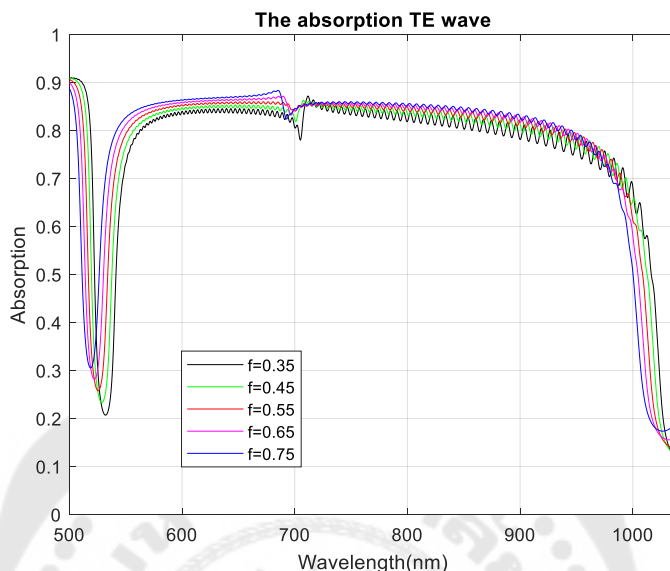
2. ผลลัพธ์ของการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อจำนวนคาบของโครงสร้างมีค่าแตกต่างกัน



ภาพประกอบ 21 ผลลัพธ์ของการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อจำนวนคาบของโครงสร้างมีค่าแตกต่างกัน

กราฟแสดงค่าการดูดกลืนเมื่อจำนวนคาบของโครงสร้างมีค่าแตกต่างกัน คือ ค่า: 10, เขียว: 30, แดง: 50, ม่วง: 70 และน้ำเงิน: 90 เมื่อแกน y แสดงสเปกตรัมการดูดกลืน และแกน x แสดงความยาวคลื่นในหน่วยนาโนเมตร พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนคาบของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลเป็น 10, 30, 50, 70 และ 90 ตามลำดับ ส่งผลให้กราฟสเปกตรัมมีค่าเพิ่มสูงขึ้นแสดงดังภาพประกอบ 21 และกราฟค่อนข้างเรียบขึ้นและมีช่วงของความยาวคลื่นที่กว้าง โดยเปอร์เซ็นต์ของประสิทธิภาพความสามารถการดูดกลืนของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลที่จำนวนคาบเท่ากับ 90 มีผลลัพธ์ของกราฟการดูดกลืนสูงถึงประมาณ 86% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับจำนวนคาบเท่ากับ 70 อยู่ที่ 85% แต่มีค่าการดูดกลืนสูงกว่าเล็กน้อย

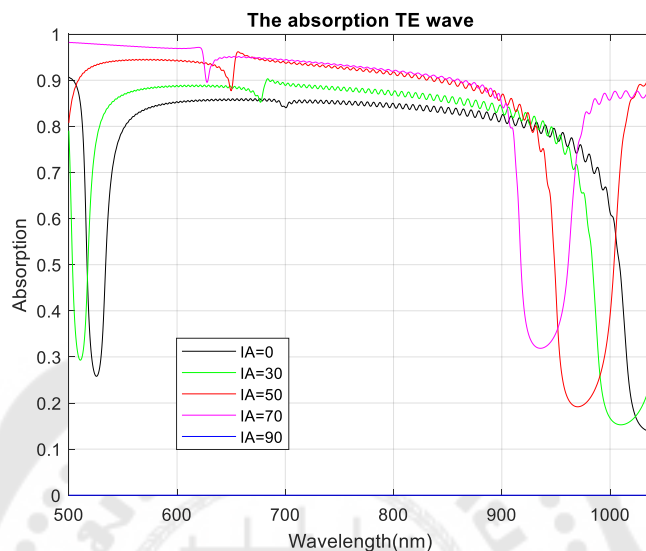
3. ผลลัพธ์ของการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อเปอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะมีค่าแตกต่างกัน



ภาพประกอบ 22 ผลลัพธ์ของการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อเปอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะมีค่าแตกต่างกัน

กราฟแสดงค่าการดูดกลืนเมื่อเปอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะมีค่าแตกต่างกัน คือ ดำ: 0.35, เขียว: 0.45, แดง: 0.55, ม่วง: 0.65 และน้ำเงิน: 0.75 เมื่อแกน y แสดงสเปกตรัมการดูดกลืน และแกน x แสดงความยาวคลื่นในหน่วยนาโนเมตรแสดงดังภาพประกอบ 22 พบว่ากราฟสเปกตรัมการดูดกลืนมีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะในโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล และเห็นได้ชัดว่ากราฟเกิดการเลื่อนทางน้ำเงิน (blue shift) หรือเกิดการเลื่อนของสเปกตรัมไปทางความยาวคลื่นที่น้อยกว่า ยิ่งเปอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะเพิ่มขึ้นส่งผลให้กราฟเกิดการเลื่อนทางซ้ายมากขึ้นด้วย กราฟสเปกตรัมค่าการดูดกลืนมีเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการดูดกลืนของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลที่เปอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะ 0.75 อยู่ในช่วง 85%-89% ซึ่งมีค่าการดูดกลืนที่สูงมาก แต่กราฟสเปกตรัมมีบางช่วงความยาวคลื่นเรียบน้อยกว่าที่เปอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะ 0.55 ซึ่งเปอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะช่วงนี้กราฟการดูดกลืนมีความเรียบมากที่สุดและเปอร์เซ็นต์ของประสิทธิภาพการดูดกลืนของกราฟมีค่าอยู่ในช่วง 83%-86% ดูดกลืนค่อนข้างดี

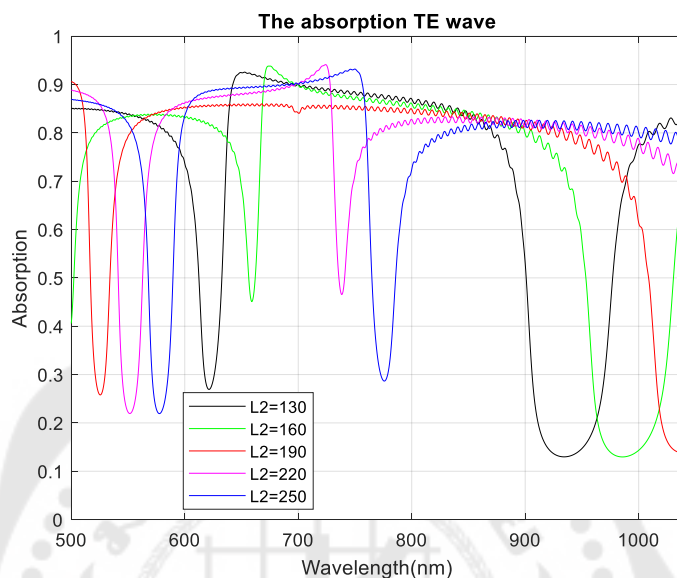
4. ผลลัพธ์ของการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อมุมตกกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าแตกต่างกัน



ภาพประกอบ 23 ผลลัพธ์ของการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อมุมตกกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าแตกต่างกัน

กราฟแสดงค่าการดูดกลืนเมื่อมุมตกกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าแตกต่างกัน คือ ค่า: 0, เขียว: 30, แดง: 50, ม่วง: 70 และน้ำเงิน: 90 เมื่อแกน y แสดงสเปกตรัมการดูดกลืน และ แกน x แสดงความยาวคลื่นในหน่วยนาโนเมตร พบว่ากราฟสเปกตรัมการดูดกลืนมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมากเมื่อมุมตกกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพิ่มขึ้นที่มุมตกกระทบ 0, 30, 50, และ 70 องศา ตามลำดับ แสดงในภาพประกอบ 23 และพบว่ากราฟสเปกตรัมการดูดกลืนเกิดการเลื่อนทางซ้ายหรือ Blue shift ไปทางด้านความยาวคลื่นที่น้อยกว่า โดยที่มุมตกกระทบ 70 องศา กราฟสเปกตรัมการดูดกลืนของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลสามารถดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสูงมีเปอร์เซ็นต์ของประสิทธิภาพการดูดกลืนอยู่ในช่วงประมาณ 90%-98% ซึ่งการดูดกลืนมีค่าค่อนข้างสูงมาก กราฟบางช่วงความยาวคลื่นมีค่าต่ำและโดยรวมยังอยู่ในช่วงกว้าง ส่วนในกรณีของมุมตกกระทบ 90 องศา พบว่าโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลในงานวิจัยนี้ไม่สามารถดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ ในกรณีมุมตกกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ 0 องศา พบว่าโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลในงานวิจัยนี้สามารถดูดกลืนอยู่ที่ประมาณ 86% ซึ่งมีค่าค่อนข้างสูง และกราฟมีความเรียบขึ้น

5. ผลลัพธ์ของการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อความหนาของชั้นอินเดียมทินออกไซด์มีค่าแตกต่างกัน

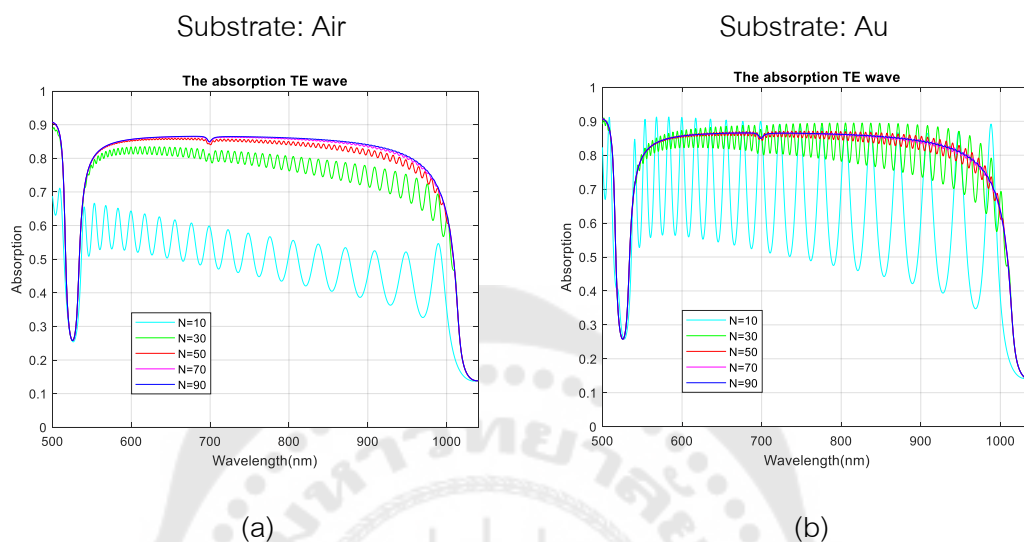


ภาพประกอบ 24 ผลลัพธ์ของการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อความหนาของชั้นอินเดียมทินออกไซด์มีค่าแตกต่างกัน

กราฟแสดงค่าการดูดกลืนเมื่อความหนาของชั้นอินเดียมทินออกไซด์มีค่าแตกต่างกัน คือ ดำ: 130, เขียว: 160, แดง: 190, ม่วง: 220 และน้ำเงิน: 250 เมื่อแกน y แสดงสเปกตรัมการดูดกลืน และแกน x แสดงความยาวคลื่นในหน่วยนาโนเมตร พบว่ากราฟสเปกตรัมการดูดกลืนของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลมีค่าค่อนข้างสูงบางช่วงของความยาวคลื่นแสดงในภาพประกอบ 24 โดยที่ความหนาของชั้นอินเดียมทินออกไซด์ 190 นาโนเมตร ผลลัพธ์ของกราฟค่อนข้างเรียบ มีค่าการดูดกลืนอยู่ที่ประมาณ 86% ซึ่งค่าการดูดกลืนค่อนข้างสูงอยู่ในช่วงกว้างและพบว่าสเปกตรัมเกิดการเลือนของกราฟไปทางความยาวคลื่นที่น้อยกว่าหรือเรียกว่าเกิดการเลื่อนทางน้ำเงิน

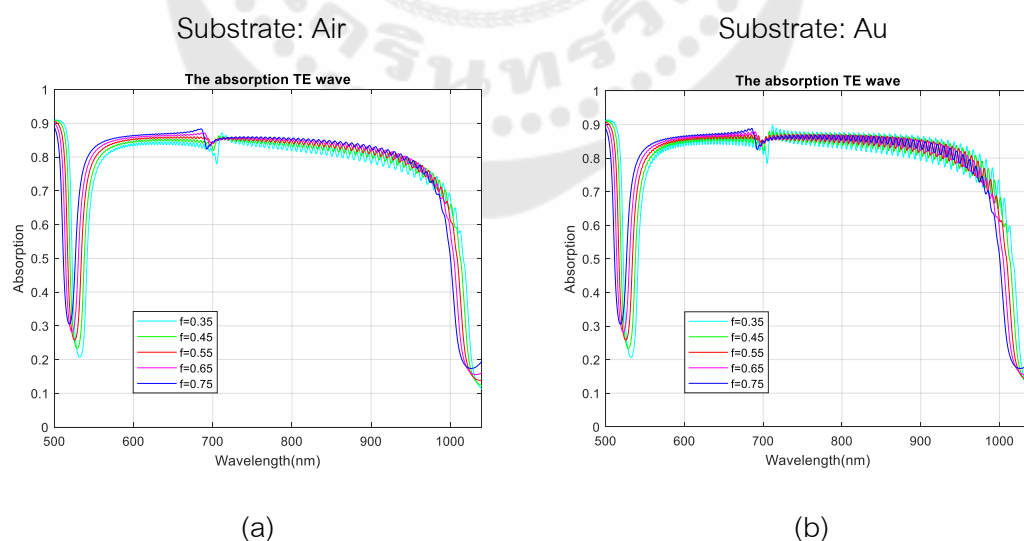
6. ผลลัพธ์ของการศึกษาสมบัติการดูดกลืนเมื่อวัสดุของฐานรองเป็นอากาศ ($n_{air} = 1.00$) เทียบกับทองคำ ($n_{Au} = 0.13$)

(6.1) วัสดุฐานรองอากาศเทียบกับทองคำที่จำนวนคาบมีค่าแตกต่างกัน



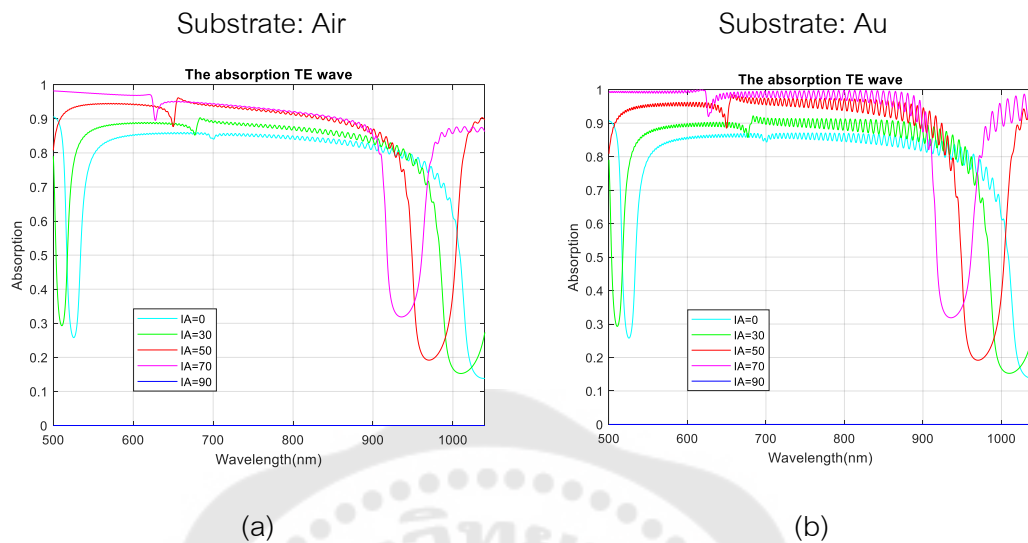
ภาพประกอบ 25 ผลลัพธ์ของสเปกตรัมการดูดกลืนเมื่อจำนวนคาบต่างกันของวัสดุฐานรอง (a) อากาศ และ (b) ทองคำ

(6.2) วัสดุฐานรองอากาศเทียบกับทองคำที่เปอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะในโครงสร้างมีค่าแตกต่างกัน



ภาพประกอบ 26 ผลลัพธ์ของสเปกตรัมการดูดกลืนเมื่อเปอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะต่างกันของวัสดุฐานรอง (a) อากาศ และ (b) ทองคำ

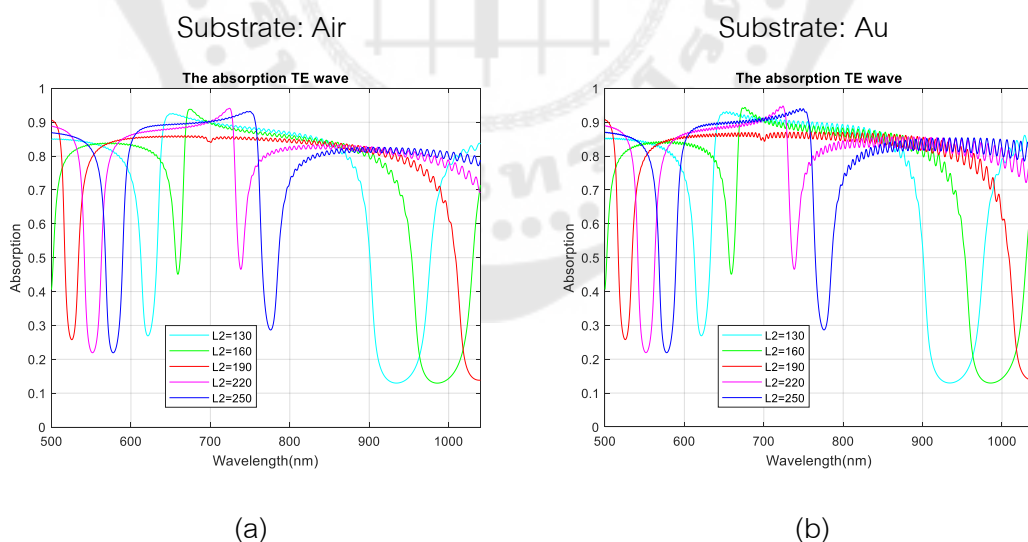
(6.3) วัสดุฐานรองอากาศเทียบกับทองคำที่มุมตกกระทบมีค่าแตกต่างกัน



ภาพประกอบ 27 ผลลัพธ์ของสเปกตรัมการดูดกลืนเมื่อมุมตกกระทบของคลื่นต่างกันของวัสดุ

ฐานรอง (a) อากาศ และ (b) ทองคำ

(6.4) วัสดุฐานรองอากาศเทียบกับทองคำที่ความหนาของชั้นอินเดียมทินออกไซด์มีค่าแตกต่างกัน



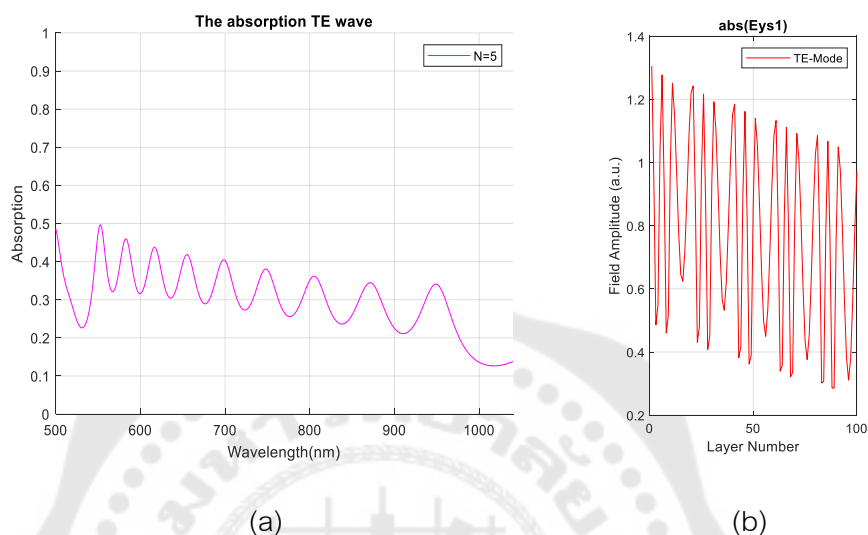
ภาพประกอบ 28 ผลลัพธ์ของสเปกตรัมการดูดกลืนเมื่อความหนาของชั้นอินเดียมทินออกไซด์

ต่างกันของวัสดุฐานรอง (a) อากาศ และ (b) ทองคำ

กราฟแสดงสเปกตรัมการดูดกลืนที่วาดกราฟระหว่างแกน y แสดงสเปกตรัมการดูดกลืน และแกน x แสดงความยาวคลื่นในหน่วยนาโนเมตร เมื่อวัสดุของฐานรองเป็นวัสดุแตกต่างกัน คือ วัสดุฐานรองอากาศแสดงในภาพประกอบ 25(a) เทียบกับวัสดุฐานรองทองคำแสดงในภาพประกอบ 25(b) ที่จำนวนคาบมีค่าแตกต่างกัน ได้แก่ 10, 30, 50, 70 และ 90 พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนคาบสูงขึ้นส่งผลให้กราฟสเปกตรัมการดูดกลืนเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง สเปกตรัมการดูดกลืนที่มีวัสดุฐานรองเป็นทองคำมีค่าสูงกว่าฐานรองอากาศเล็กน้อย เนื่องจากมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาตกกระทบบนโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล ส่งผลให้คลื่นวิ่งผ่านเข้าไปในโครงสร้างส่งผลให้โครงสร้างสามารถดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้บางส่วนถูกส่งผ่านไปยังวัสดุฐานรอง ดังนั้นวัสดุฐานรองจึงควรเป็นวัสดุประเภทโลหะ วัสดุที่เลือกใช้เป็นวัสดุฐานรองคือทองคำ โดยทองคำจะทำหน้าที่สะท้อนบางส่วนที่ยังไม่ดูดกลืน ส่งผลให้โฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลสามารถดูดกลืนได้ดียิ่งขึ้น วัสดุฐานรองอากาศในภาพประกอบ 26(a) เทียบกับวัสดุฐานรองทองคำในภาพประกอบ 26(b) ที่เปอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะในโครงสร้างผลึกมีค่าแตกต่างกัน ได้แก่ 0.35, 0.45, 0.55, 0.65 และ 0.75 พบว่าเมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ความเป็นโลหะในโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลส่งผลให้โครงสร้างสามารถดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น วัสดุฐานรองอากาศเทียบกับวัสดุฐานรองทองคำที่มุมตกกระทบมีค่าแตกต่างกัน ได้แก่ 0, 30, 50, 70 และ 90 องศา พบว่าเมื่อเทียบกราฟทั้งสองผลการดูดกลืนออกมาใกล้เคียงกันมาก แต่วัสดุฐานรองอากาศในภาพประกอบ 27(a) สามารถดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าน้อยกว่าวัสดุฐานรองทองคำในภาพประกอบ 27(b) อย่างเห็นได้ชัด วัสดุฐานรองอากาศในภาพประกอบ 28(a) เทียบกับวัสดุฐานรองทองคำในภาพประกอบ 28(b) ที่ความหนาของชั้นอินเดียมทินออกไซด์มีค่าแตกต่างกัน ได้แก่ 130, 160, 190, 220 และ 250 นาโนเมตร พบว่ากราฟสเปกตรัมการดูดกลืนของวัสดุฐานรองที่เป็นทองคำมีค่าสูงกว่าอากาศเล็กน้อยและเกิดการเลื่อนของสเปกตรัมไปทางความยาวคลื่นที่น้อยกว่าหรือเรียกว่าเกิดปรากฏการณ์เลื่อนทางน้ำเงิน ความหนาของชั้นไดอิเล็กทริกที่เหมาะสมกับความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ส่งผลให้กราฟสเปกตรัมการดูดกลืนสูงขึ้นด้วย

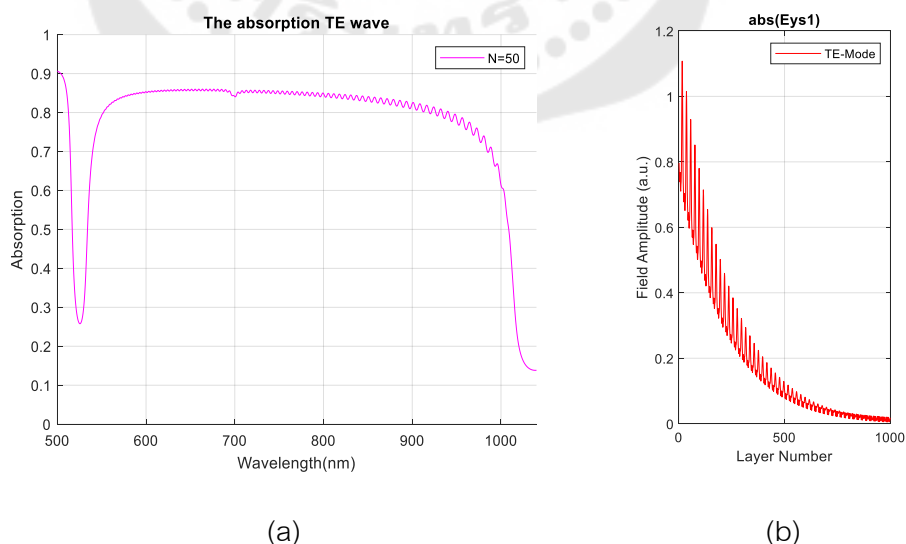
7. ผลลัพธ์ของการศึกษาสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ในโครงสร้างผลึกโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัล

(7.1) สนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ในโครงสร้างผลึก PHC ที่ $N = 5$ (Substrate: Air)



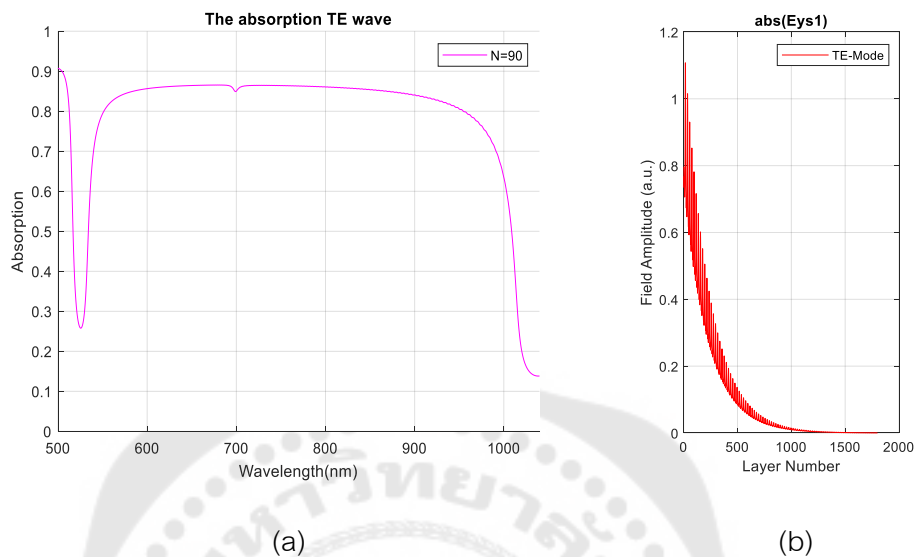
ภาพประกอบ 29 (a) ผลลัพธ์ของสเปกตรัมการดูดกลืนที่จำนวนคาบเท่ากับ 5 และ (b) กราฟสนามไฟฟ้าภายในโครงสร้าง PHC ที่จำนวนคาบเท่ากับ 5 ของวัสดุฐานรองอากาศ

(7.2) สนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ในโครงสร้างผลึก PHC ที่ $N = 50$ (Substrate: Air)



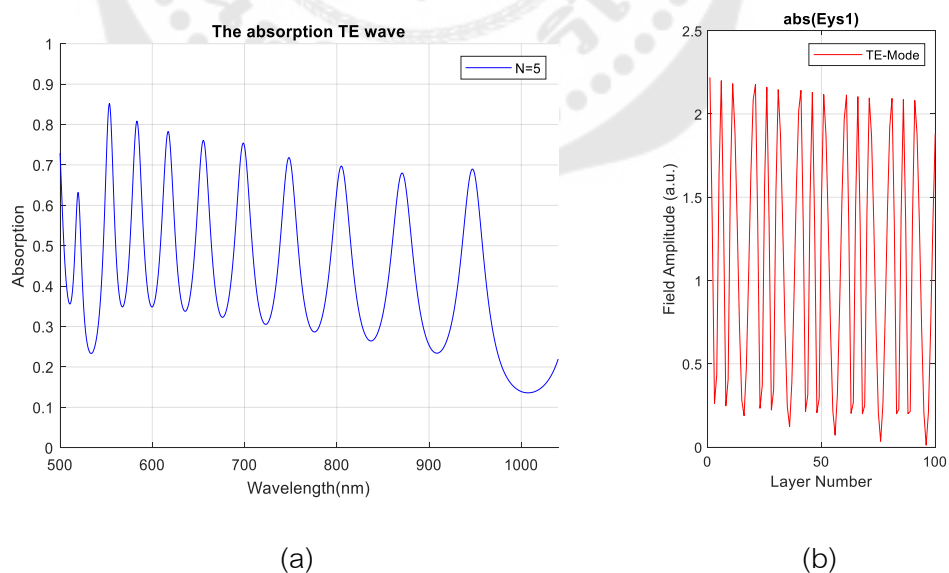
ภาพประกอบ 30 (a) ผลลัพธ์ของสเปกตรัมการดูดกลืนที่จำนวนคาบเท่ากับ 50 และ (b) กราฟสนามไฟฟ้าภายในโครงสร้าง PHC ที่จำนวนคาบเท่ากับ 50 ของวัสดุฐานรองอากาศ

(7.3) สนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ในโครงสร้างผลึก PHC ที่ $N = 90$ (Substrate: Air)



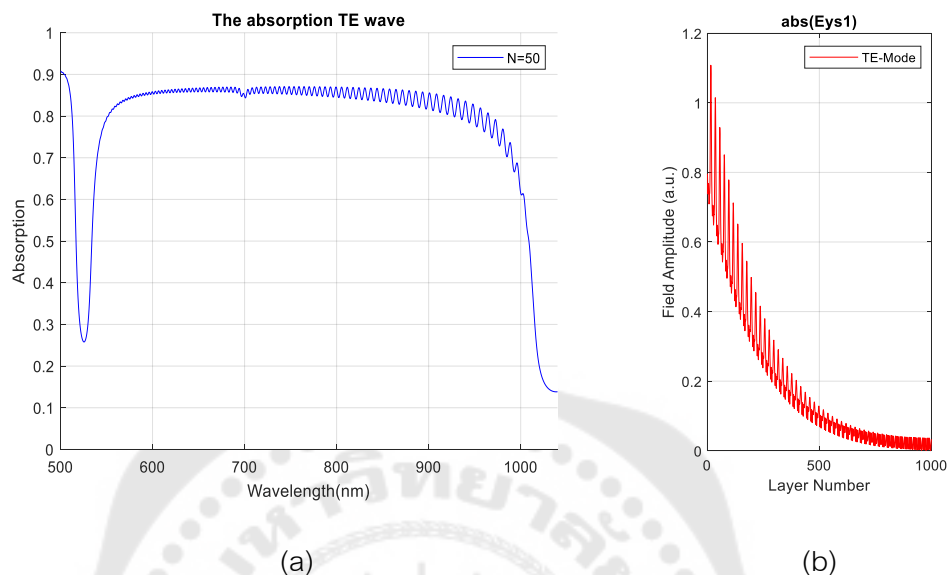
ภาพประกอบ 31 (a) ผลลัพธ์ของสเปกตรัมการดูดกลืนที่จำนวนคาบเท่ากับ 90 และ (b) กราฟสนามไฟฟ้าภายในโครงสร้าง PHC ที่จำนวนคาบเท่ากับ 90 ของวัสดุฐานรỗngอากาศ

(7.4) สนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ในโครงสร้างผลึก PHC ที่ $N = 5$ (Substrate: Au)



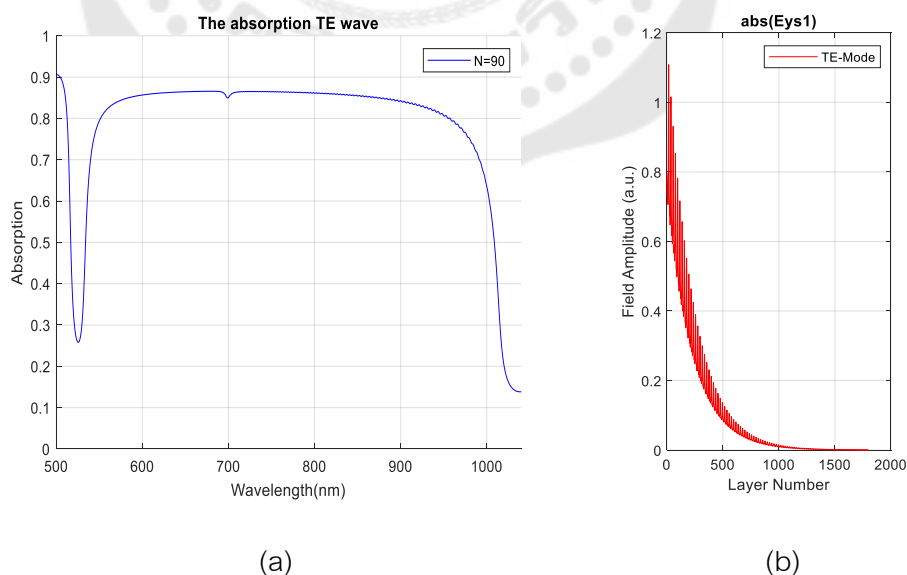
ภาพประกอบ 32 (a) ผลลัพธ์ของสเปกตรัมการดูดกลืนที่จำนวนคาบเท่ากับ 5 และ (b) กราฟสนามไฟฟ้าภายในโครงสร้าง PHC ที่จำนวนคาบเท่ากับ 5 ของวัสดุฐานรองทองคำ

(7.5) สนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ในโครงสร้างผลึก PHC ที่ $N = 50$ (Substrate: Au)



ภาพประกอบ 33 (a) ผลลัพธ์ของสเปกตรัมการดูดกลืนที่จำนวนคาบเท่ากับ 50 และ (b) กราฟ
สนามไฟฟ้าภายในโครงสร้าง PHC ที่จำนวนคาบเท่ากับ 50 ของวัสดุฐานรองทองคำ

(7.6) สนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ในโครงสร้างผลึก PHC ที่ $N = 90$ (Substrate: Au)



ภาพประกอบ 34 ผลลัพธ์ของสเปกตรัมการดูดกลืนที่จำนวนคาบเท่ากับ 90 และ (b) กราฟ
สนามไฟฟ้าภายในโครงสร้าง PHC ที่จำนวนคาบเท่ากับ 90 ของวัสดุฐานรองทองคำ

สเปกตรัมการดูดกลืนของโครงสร้างผลึกโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลที่วาดกราฟระหว่างแกน $\hat{y}$ แสดงสเปกตรัมการดูดกลืน และแกน $\hat{x}$ แสดงความยาวคลื่นในหน่วยนาโนเมตรที่จำนวนคาบเท่ากับ 5 แสดงในภาพประกอบ 29(a) และกราฟสนามไฟฟ้าภายในโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลของวัสดุฐานรองอากาศที่วาดกราฟระหว่างแกน $\hat{y}$ แสดงค่าสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Field Amplitude) และแกน $\hat{x}$ แสดงจำนวนคาบ (Layer Number) แสดงในภาพประกอบ 29(b) พบว่าผลลัพธ์ของสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ในโครงสร้างผลึกโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลในโหมด TE (Field amplitude calculation s-polarization) เมื่อเพิ่มจำนวนคาบมากขึ้นส่งผลให้กราฟสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์มีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกราฟสเปกตรัมการดูดกลืนพบว่ามีความสอดคล้องกันเนื่องจากกราฟสเปกตรัมการดูดกลืนมีค่าไม่สูงมากส่งผลให้กราฟสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์มีค่าสูงภายในโครงสร้าง สเปกตรัมการดูดกลืนของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลที่จำนวนคาบเท่ากับ 50 แสดงในภาพประกอบ 30(b) และกราฟสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ภายในโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลที่วัสดุฐานรองเป็นอากาศแสดงในภาพประกอบ 30(b) พบว่ามีความสอดคล้องกันอย่างเห็นได้ชัดโดยที่จำนวนคาบเพิ่มขึ้นส่งผลให้โฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลสามารถดูดกลืนได้สูงขึ้น และส่งผลให้สนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ภายในโครงสร้างมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง สเปกตรัมการดูดกลืนของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลที่จำนวนคาบเท่ากับ 90 แสดงในภาพประกอบ 31(a) และกราฟสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ภายในโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลที่วัสดุฐานรองอากาศแสดงในภาพประกอบ 31(b) พบว่าจำนวนคาบเพิ่มขึ้นส่งผลให้โฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลสามารถดูดกลืนได้สูงขึ้น และส่งผลให้สนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ภายในโครงสร้างมีค่าลดลงมากอย่างต่อเนื่อง สเปกตรัมการดูดกลืนของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลวัสดุฐานรองทองคำที่จำนวนคาบเท่ากับ 5 แสดงในภาพประกอบ 32(a) และกราฟสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ภายในโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลที่วัสดุฐานรองทองคำแสดงในภาพประกอบ 32(b) พบว่าจำนวนคาบเพิ่มขึ้นส่งผลให้โฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลสามารถดูดกลืนได้น้อย และส่งผลให้สนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ภายในโครงสร้างมีค่าลดลงเล็กน้อย สเปกตรัมการดูดกลืนของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลที่จำนวนคาบเท่ากับ 50 แสดงในภาพประกอบ 33(a) และกราฟสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ภายในโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลที่วัสดุฐานรองทองคำแสดงในภาพประกอบ 33(b) พบว่าจำนวนคาบเพิ่มขึ้นส่งผลให้โฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลสามารถดูดกลืนได้สูงขึ้น และส่งผลให้สนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ภายในโครงสร้างมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง สเปกตรัมการดูดกลืนของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลที่จำนวนคาบเท่ากับ 90 แสดงในภาพประกอบ 34(a) และกราฟสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ภายในโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลที่วัสดุฐานรองทองคำแสดงในภาพประกอบ 34(b) โดยมีความสอดคล้องกันมากเมื่อเพิ่มจำนวนคาบสูงขึ้นส่งผล

ให้โครงสร้างของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลสามารถดัดกลืนได้เพิ่มสูงขึ้น และส่งผลให้สนามไฟฟ้าสัมผัสภายในโครงสร้างมีค่าลดลงมากอย่างต่อเนื่องเมื่อเทียบกับโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลที่จำนวนคาบน้อยกว่า



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยเรื่องการศึกษาสมบัติการดูดกลืนของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน ผู้วิจัยได้ทำการประเมินประสิทธิภาพของโครงสร้าง โดยการประเมินผลใช้โครงสร้างเพื่อวิเคราะห์หาค่าการดูดกลืนด้วยวิธีการเมทริกซ์ถ่ายโอน หลังจากได้ผลการดำเนินงานแล้ว สามารถสรุปผลการดำเนินงาน โดยแบ่งหัวข้อในการสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. สรุปผลการวิจัย
2. อภิปรายผลการวิจัย
3. ข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาค้นคว้างานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

- 1) โครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลมีช่วงกว้างของความยาวคลื่นมีสเปกตรัมการดูดกลืนอยู่ในช่วง 500 ถึง 1,000 นาโนเมตร สำหรับคลื่นตกกระทบโพลาไรเซชันในโหมด TE แต่สำหรับค่าการดูดกลืนของคลื่นโพลาไรเซชันโหมด TM สำหรับโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลมีค่าน้อยมาก
- 2) สเปกตรัมค่าการดูดกลืนที่เราสนใจมีช่วงที่กว้างขึ้น เมื่อเพิ่มความหนาของชั้นไดอิเล็กตริก (I_2) และมีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 190 นาโนเมตร ในส่วนความหนาของชั้นอวิวดูแบบไฮเพอร์โบลิก (I_1) มีค่าเป็น 300 นาโนเมตร เนื่องจากเป็นความหนาของวัสดุที่เหมาะสมกับความยาวคลื่นที่ศึกษา
- 3) ค่าการดูดกลืนของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มจำนวนคาบ (N) และตัวประกอบสัดส่วนปริมาตรของโลหะในไดอิเล็กตริก (f) ที่เหมาะสมกับโครงสร้าง
- 4) การดูดกลืนของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมุมตกกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น และมุมตกกระทบที่ทำให้โครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลมีค่าการดูดกลืนสูงสุดคือ 0 องศา ส่วนมุมตกกระทบที่ 90 องศา ทำให้โครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลในงานวิจัยนี้ไม่สามารถดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้
- 5) กราฟสเปกตรัมค่าการดูดกลืนของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อวัสดุของฐานรองเป็นอากาศ ($n_{air} = 1.00$)

6) ดังนั้นจากผลการคำนวณ สามารถนำโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลมาพัฒนาเป็นอุปกรณ์ดูดกลืนพลังงานคลื่นโพลาไรเซชันในโหมด TE (the TE-polarized broadband absorber for photovoltaic) และเป็นแนวทางในการพัฒนาเป็นอุปกรณ์การเก็บเกี่ยวพลังงานที่มีอยู่รอบตัว (energy harvesting)

7) จากการคำนวณพบว่ากราฟสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องสอดคล้องกับค่าของกราฟสเปกตรัมการดูดกลืน โดยมีค่าสูงขึ้นในย่านความยาวคลื่นที่มีช่วงกว้างขึ้นของคลื่นโพลาไรเซชันในโหมด TE ส่วนทางด้านโหมด TM ได้คำนวณเพื่อดูกราฟค่าการดูดกลืนและสนามไฟฟ้าภายในโครงสร้างพบว่ามีการดูดกลืนที่ค่อนข้างต่ำมากและกราฟค่าสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ไม่สามารถนำมาคำนวณได้ ดังนั้นโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลที่ผู้วิจัยได้ออกแบบสามารถดูดกลืนได้เฉพาะคลื่นโพลาไรเซชันในโหมด TE ได้เท่านั้น

8) สเปกตรัมการดูดกลืนของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลเมื่อเปลี่ยนวัสดุฐานรองจากเดิมเป็นอากาศ ($n_{air} = 1.00$) เป็นวัสดุฐานรองชนิดโลหะคือ ทองคำ ($n_{Au} = 0.13$) พบว่าวัสดุฐานรองชนิดโลหะนี้สามารถทำให้โครงสร้างสามารถดูดกลืนได้เพิ่มขึ้น เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าวิ่งผ่านตัวโครงสร้างอวิสคูปแบบไฮเพอร์โบลิกมาถึงวัสดุฐานรอง วัสดุฐานรองทองคำจะทำหน้าที่สะท้อนสเปกตรัมบางส่วนที่ยังไม่ดูดกลืนในโครงสร้าง ส่งผลให้โครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลสามารถดูดกลืนได้ดีขึ้น

2. อภิปรายผลการวิจัย

ผลการศึกษาค้นคว้าการวิจัยเรื่องการศึกษาสมบัติการดูดกลืนของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอนในครั้งนี้ อภิปรายผลได้ดังนี้

1. การวิจัยเรื่องการศึกษาสมบัติการดูดกลืนของโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอนในครั้งนี้ ทำให้ผู้วิจัยสามารถวิเคราะห์หาค่าการดูดกลืนด้วยวิธีการเมทริกซ์ถ่ายโอนในโครงสร้างวัสดุชนิดโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลได้

2. จากการคำนวณผลการดูดกลืนของโครงสร้างทำให้สามารถวิเคราะห์ลักษณะของโครงสร้างที่มีส่วนประกอบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการทำงานของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลได้แก่ จำนวนคาบ ความหนาของชั้นวัสดุ มุมตกกระทบ เปอร์เซนต์ความเป็นโลหะในโครงสร้าง และวัสดุฐานรอง

3. การเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมการดูดกลืนของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลของคลื่นโพลาไรเซชันในโหมด TE และโหมด TM เทียบกันพบว่าโครงสร้างที่ผู้วิจัยออกแบบนี้สามารถดูดกลืนได้เฉพาะโหมด TE เท่านั้น มีค่าการดูดกลืนสูงถึงประมาณ 90% ในส่วนของโหมด

TM ไม่สามารถดูดกลืนได้ ดังนั้นอยู่ในการนำไปพัฒนาต่อยอดต่อไปให้โครงสร้างสามารถดูดกลืนคลื่นในโหมดนี้ได้ในอนาคต

4. ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้ในเรื่องการศึกษาสมบัติการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยทางด้านการเก็บเกี่ยวพลังงานทางด้านเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าการดูดกลืนพลังงานของโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลถูกออกแบบให้สามารถรองรับช่วงความยาวคลื่นที่กว้างกว่าเซลล์แสงอาทิตย์เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์อาจมีข้อจำกัดที่ค่อนข้างมากในด้านการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากดวงอาทิตย์เพื่อแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า แต่ปริมาณของพลังงานไฟฟ้าที่ได้ค่อนข้างต่ำเพราะแปรผันตามสภาพอากาศที่ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงจากดวงอาทิตย์ ในงานวิจัยนี้ออกแบบเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาข้ามข้อจำกัดบางช่วงความยาวคลื่นให้สามารถนำพลังงานที่มีอยู่รอบตัวมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

3. ข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ ผู้วิจัยได้สรุปข้อเสนอแนะไว้ดังนี้

1. ในการวิจัยครั้งนี้สามารถนำมาวิจัยและพัฒนาต่อยอดองค์ความรู้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลที่ผู้วิจัยออกแบบและช่วงของการดูดกลืนย่านความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตามองเห็นและรังสีอินฟราเรดคลื่นใกล้ที่กว้างขึ้น รวมทั้งสามารถรองรับการดูดกลืนคลื่นโพลาริเซชันในโหมด TE ได้ดี

2. จากการเรียนรู้ ศึกษา และทำการวิจัย ทำให้เข้าใจหลักการทางฟิสิกส์ของสมบัติการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุมาวิเคราะห์เพื่อออกแบบโครงสร้างวัสดุที่สนใจในงานวิจัยนี้ นำไปสู่การได้ชุดคำสั่งสำหรับการคำนวณหาค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลด้วยระเบียบวิธีเมทริกซ์ถ่ายโอน

3. ด้านต่อมาสามารถพัฒนาต่อยอดในด้านเกี่ยวกับการดูดกลืนพลังงาน เพื่อเป็นแนวทางการทำอุปกรณ์ดูดกลืน หรืออุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานต่าง ๆ ที่มีอยู่รอบตัวออกมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด เพื่อในอนาคตได้อุปกรณ์ผลิตและแหล่งพลังงานชนิดใหม่ออกมาใช้ประโยชน์

4. ข้อเสนอแนะอีกข้อที่สำคัญสำหรับการทำวิจัยครั้งต่อไป คือการออกแบบและพัฒนาโครงสร้างโฟโตนิกไฮเพอร์คริสตัลให้สามารถดูดกลืนคลื่นได้ทั้งคลื่นโพลาริเซชันในโหมด TE และ TM และสามารถรองรับได้หลายความยาวคลื่นในช่วงที่กว้างขึ้นได้ในอนาคต

บรรณานุกรม

- AlShareef, M. R., & Ramahi, O. M. (2013). Electrically small resonators for energy harvesting in the infrared regime. *Journal of Applied Physics*, 114(22), 6. doi:10.1063/1.4846076
- Du, Q. G., Kam, C. H., Demir, H. V., Yu, H. Y., & Sun, X. W. (2011). Broadband absorption enhancement in randomly positioned silicon nanowire arrays for solar cell applications. *Optics Letters*, 36(10), 1884-1886. doi:10.1364/ol.36.001884
- Fang, H., Cao, J., Liu, J., Wang, C., Yue, X., & Wu, J. (2017). *Photonic bandgap properties of one-dimensional graphene-based photonic crystals with a single dielectric*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Ferrari, L., Wu, C. H., Lepage, D., Zhang, X., & Liu, Z. W. (2015). Hyperbolic metamaterials and their applications. *Progress in Quantum Electronics*, 40, 1-40. doi:10.1016/j.pquantelec.2014.10.001
- Hoffman, A. J., Alekseyev, L., Howard, S. S., Franz, K. J., Wasserman, D., Podolskiy, V. A., . . . Gmachl, C. (2007). Negative refraction in semiconductor metamaterials. *Nature Materials*, 6(12), 946-950. doi:10.1038/nmat2033
- Jakšić, Z., Dalarsson, N., & Maksimović, M. (2006). Negative refractive index metamaterials: Principles and applications. *Mikrotalasna revija*.
- Johnson, & Christy. (1972a). Optical constants of Ag Au Al Cu Pb. *refractive index database* Retrieved from <https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=Ag&page=Johnson>
- Johnson, & Christy. (1972b). Optical constants of Au (Gold). *refractive index database*. Retrieved from <https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=Au&page=Johnson>
- Li, J.-J., Li, Z.-Y., & Zhang, D.-Z. (2007). Second harmonic generation in one-dimensional nonlinear photonic crystals solved by the transfer matrix method. *Physical Review E*, 75(5), 056606.
- Liu, Y. M., Bartal, G., & Zhang, X. (2008). All-angle negative refraction and imaging in a

- bulk medium made of metallic nanowires in the visible region. *Optics Express*, 16(20), 15439-15448. doi:10.1364/oe.16.015439
- Lu, G., Wu, F., Zheng, M., Chen, C., Zhou, X., Diao, C., . . . Jiang, H. (2019). Perfect optical absorbers in a wide range of incidence by photonic heterostructures containing layered hyperbolic metamaterials. *Optics Express*, 27(4), 5326-5336.
- Malitson. (1965). Optical constants of SiO₂ TiO₂ ITO. *refractive index database*. Retrieved from <https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=SiO2&page=Malitson>
- Moerland, & Hoogenboom. (2016). Optical constants of In₂O₃-SnO₂ (Indium tin oxide, ITO). *refractive index database*.
- Narimanov, E. E. (2014). Photonic Hypercrystals. *Physical Review X*, 4(4), 13. doi:10.1103/PhysRevX.4.041014
- Noginov, M. A., & Podolskiy, V. A. (2011). *Tutorials in metamaterials*: CRC press.
- Palik, E. D. (1998). *Handbook of optical constants of solids* (Vol. 3): Academic press.
- Ren, Y., Chen, J., & Zhang, Y. (2011). Optical properties and thermal response of copper films induced by ultrashort-pulsed lasers. *Journal of Applied Physics*, 110(11), 113102.
- Shekhar, P., Atkinson, J., & Jacob, Z. (2014). Hyperbolic metamaterials: fundamentals and applications. *Nano convergence*, 1(1), 14.
- Wicham, S., & Buranasiri, P. (2018). Quasibirefringent phase-matching technique for third-harmonic pulse generation from multilayered metamaterials. *Optical Engineering*, 57(11), 11. doi:10.1117/1.oe.57.11.111803
- Yao, J., Wang, Y., Tsai, K. T., Liu, Z. W., Yin, X. B., Bartal, G., . . . Zhang, X. (2011). Design, fabrication and characterization of indefinite metamaterials of nanowires. *Philosophical Transactions of the Royal Society a-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 369(1950), 3434-3446. doi:10.1098/rsta.2011.0159

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล

นรีพร เรืองจันทร์

วัน เดือน ปี เกิด

9 กรกฎาคม 2537

สถานที่เกิด

ชุมพร

วุฒิการศึกษา

พ.ศ. 2559

วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

พ.ศ. 2563

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

