



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์เพื่อการประยุกต์ใช้ทางด้านไฟฟ้า
และแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ไมโครเวฟ

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์นันทกานต์ วงศ์เกษม

พฤษภาคม 2553

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์เพื่อการประยุกต์ใช้ทางด้าน
ไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ไมโครเวฟ

คณะผู้วิจัย

สังกัด

นันทกานต์ วงศ์เกษม

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์เล่มนี้ ได้นำเสนอการออกแบบโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ประเภท ไครอล ไอโซทรอปิก ที่มีดัชนีการหักเหของแสงติดลบ โดยได้ใช้ทฤษฎีกลุ่มเพื่อใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์หาค่าประกอบทางแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง โดยได้เลือกโครงสร้างในกลุ่ม C_n ซึ่งมีคุณสมบัติตามที่ต้องการข้างต้น ได้ใช้วิธีการวัดความต่อเนื่องของลักษณะสมมาตรและวิธีการแบ่งครึ่งมุมสมมาตร ในการตรวจสอบคุณสมบัติไครอลิตีของโครงสร้างที่ได้ทำการออกแบบ ซึ่งพบว่าค่าดัชนีไครอลิตีของโครงสร้างนั้นขึ้นอยู่กับมุมที่เกิดจากแกนหลักและแกนย่อยของโครงสร้าง และยังเพิ่มขึ้นตามจำนวนแกนของ C_n อีกด้วย ทฤษฎีการวิเคราะห์ห้วงจรถูกนำมาใช้เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ค่าความจุไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญของการกำหนดตำแหน่งของค่ายังผลของพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งส่งผลไปถึงการกำหนดตำแหน่งของการเกิดค่าดัชนีการหักเหของแสงที่ติดลบของโครงสร้าง โดยได้แบ่งทำการศึกษาในการปรับแต่งโครงสร้างให้มีคุณสมบัติดัชนีการหักเหของแสงติดลบออกเป็น 3 ส่วน คือ การจัดวางโครงสร้างในลักษณะต่างๆ อัตราส่วนของแกนหลักและแกนย่อย และการเพิ่มแกนเสริมของโครงสร้าง ซึ่งพบว่าปัจจัยดังกล่าวล้วนส่งผลต่อลักษณะต่อคุณสมบัติของการส่งผ่านของสัญญาณ และค่ายังผลของพารามิเตอร์ทาง แม่เหล็กไฟฟ้าอื่นๆด้วย จาก การปรับแต่งโครงสร้างในกลุ่ม C_n ที่ได้ทำการออกแบบ พบว่าโครงสร้างมีคุณสมบัติที่สามารถแสดงคุณสมบัติไอโซทรอปิกได้ในหลายทิศทาง อีกทั้งยังมีค่าดัชนีการหักเหของแสงติดลบในย่าน ความถี่ที่ต้องการ โดยมีอัตราการสูญเสียของสัญญาณต่ำ และได้สร้างวัสดุโครงสร้างต้นแบบพร้อมทั้งวัดผล ซึ่งผลการวัดที่ได้และผลจากการออกแบบทางทฤษฎีและการประมวลผลทางคอมพิวเตอร์สอดคล้องกัน

ABSTRACT

In this research chiral isotropic metamaterials with negative index of refraction design are proposed. Group theory was used in classifying and designing effective electromagnetic parameter of the structures. Containing all of the desired properties, C_n point group was selected. Chirality of the structures is then checked by continuous chiral measures and angular bisection method. The calculation results have shown that the chirality index is related to the orientation of the structure i.e. the angle between the main axis and the arm of the structure. Furthermore, by increasing the number of arms or the subscription “n” of the structure C_n , the chirality is improved. Circuit analysis is chosen to help with the analysis of the capacitance and inductance. They are important factors in designing the location of magnetic resonance. The resonance significantly affects the location of the negative index of refraction. Structure modification is divided into three major parts, which are: the structure’s orientation, a ratio of the main axis to the connected arm, and an extra arm of the structure. All of these factors affect the properties of transmission characteristics and effective material parameters. The proposed C_n point group structures present an isotropic property in many directions and also generate a negative index of refraction bandwidth with low losses. Furthermore, one of the designed structures are fabricated and measured. The measurement results agree well with those from analytical design and simulation.

หน้าสรุปโครงการ (Executive Summary)

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การศึกษา Meta-materials เริ่มมีตั้งแต่ปี ค.ศ. 1904 โดย Sir Arthur Schuster และ H. Lamb ซึ่งได้ศึกษาความเร็วเฟสที่ติดลบ (Negative Phase Velocity) (Schuster, Lamb, 1904) หลังจากนั้นในปี ค.ศ. 1968 V. G. Veselago (Veselago, 1968) นักวิทยาศาสตร์ชาวรัสเซีย ได้ศึกษาคุณสมบัติแสงของวัสดุที่มีดัชนีการหักเหเป็นลบ (Negative Refractive Index, $(-n)$) และเนื่องจากวัสดุนั้นๆ มีค่า Permittivity (ϵ) และ Permeability (μ) ติดลบ (Veselago, 1968) ซึ่งไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในวัสดุตามธรรมชาติใดๆ วัสดุดังกล่าว จึงถูกจัดเป็นวัสดุสังเคราะห์ทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า Veselago ได้แสดงปรากฏการณ์ทางแสงต่างๆ ที่สามารถเกิดขึ้นได้ในวัสดุดังกล่าว แต่นั่นก็เป็นเพียงการคำนวณและแสดงผลทางทฤษฎีเท่านั้น ในปี ค.ศ. 1999 ศาสตราจารย์ Sir John Pendry และคณะ ได้เสนอโครงสร้างของวัสดุที่มีค่า Permittivity และ Permeability ติดลบ (โครงสร้าง Split Ring Resonator (SRR) สำหรับวัสดุที่มี $(-)\mu$ และ โครงสร้าง Array of Wires สำหรับวัสดุที่มี $(-)\epsilon$) อย่างไรก็ตามการศึกษาและพัฒนาวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ (Electromagnetic Metamaterials) เริ่มมีขึ้นอย่างจริงจังเมื่อวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ ประเภทดัชนีการหักเหเป็นลบ ได้ถูกสร้างขึ้นจริงโดยกลุ่มของศาสตราจารย์ D. R. Smith จากมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนียแห่งซานดิเอโก (UCSD) ในปี ค.ศ. 2000 จากคุณสมบัติพิเศษที่ไม่มีในวัสดุใดๆ ในธรรมชาติและมีความเป็นไปได้ที่สามารถนำ Metamaterials ไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ ในปี ค.ศ. 2003 วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ถูกจัดเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ค้นพบแห่งปีจากนิตยสาร Science

วัสดุแม่เหล็กสังเคราะห์หรือ Artificial Magnetic Metamaterials นั้น โครงสร้างที่ประกอบเป็นวัสดุ จะถูกจัดเรียงเป็นลักษณะคาบ หรือ Periodic Inclusions และขนาดของโครงสร้าง (Size of structure) จะมีขนาดเล็กกว่า ความยาวคลื่นที่ใช้ในช่วงทำงาน (Operating Wavelength) เพื่อที่วัสดุจะสามารถแสดงคุณสมบัติความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous property) ส่วน Periodic Inclusions จะประพฤติตัวเป็นโมเลกุลสังเคราะห์ (Artificial Molecule) ที่จะ Interact กับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ที่ได้ถูกออกแบบโครงสร้างอย่างเหมาะสม จะสามารถทำให้ตัวประกอบของทั้งสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กเชื่อมรวมกับเมทาอะตอม (Meta-atom) (โดยปกติวัสดุในธรรมชาติจะมีเฉพาะตัวประกอบของสนามไฟฟ้าที่สามารถปฏิสัมพันธ์กับอะตอมของวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ) ทำให้เกิดคุณสมบัติใหม่ทางด้านแสง เช่น แสงสองด้านมือ ("Two-handed" light) และ ดัชนีหักเหที่มีค่าติดลบ (Negative Refractive Index) จากคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าและฟิสิกส์ของ วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ เราอาจแบ่งวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ออกเป็นประเภทต่างๆ ได้ดังนี้

1. Negative Index Metamaterials (Double Negative)
(Permittivity (ϵ) และ Permeability (μ) มีค่าน้อยกว่าศูนย์)
2. Single Negative Metamaterials
(Permittivity หรือ Permeability มีค่าน้อยกว่าศูนย์)
3. Chiral Metamaterials
(มี Cross Polarization Terms (ζ , ξ))

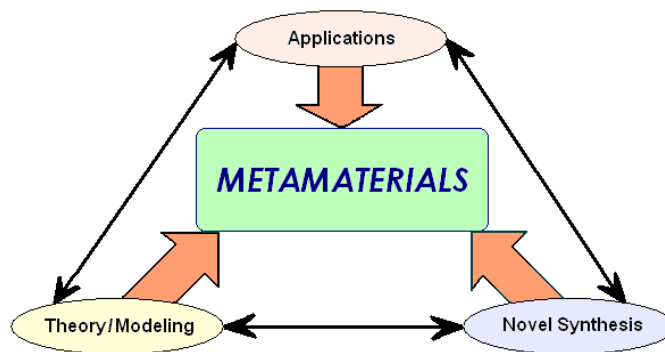
แม้ว่าได้มีการคิดค้น และพัฒนาโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์มาอย่างต่อเนื่อง เริ่มจากการศึกษาโครงสร้าง Split Ring Resonator (SRR) และ โครงสร้างรวม Metamaterials ที่รวม SRR และ Wires เข้าด้วยกัน โดยกลุ่มวิจัยของ Imperial College (John Pendry และคณะ), UCSD และ Duke University (D. R. Smith และคณะ), MIT (J. A. Kong และคณะ), Iowa State University (N. Katsarakis และคณะ) และอื่นๆ ยังได้มีการคิดค้นโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ ที่มีคุณสมบัติ Chirality และ ดัชนีหักเหที่มีค่าติดลบ ในโครงสร้างเดียวกัน เพื่อใช้ในอุปกรณ์การตรวจสอบยา (Drug Discovery) เมื่อปี 2006 โดยกลุ่มนักวิจัยจาก University of Massachusetts (A. Akyurtlu และคณะ) ประเทศสหรัฐอเมริกา หรือ การใช้วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์เคลือบเพื่อสร้างวัตถุล่องหน (Invisible Objects) (ค.ศ. 2007) กลุ่มนักวิจัยจาก Imperial College ประเทศอังกฤษ อย่างไรก็ตาม **การศึกษาวัดุดแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ยังคงอยู่ในระดับเริ่มต้น** และยังมีช่องว่างให้ศึกษาและพัฒนา เพื่อประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น วัสดุเคลือบ (Coating Materials), เครื่องกรองสัญญาณ (Filters), ตัวเซ็นเซอร์ (Sensors), สายอากาศ (Antenna), เลนส์ (Lens) โยแก้วนำแสง (Fiber Optics) รวมถึงสร้างอุปกรณ์ใหม่ๆ ได้อีกด้วย รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างประเภทของ Metamaterials กับการประยุกต์ใช้วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ในด้านต่างๆ

<u>METAMATERIALS</u>	<u>APPLICATIONS</u>
Composite Dielectrics/Magnetodielectrics	→ Antennas (Electrically Large, Physically Small, Embedded, etc.)
Superparaelectrics/Nanostructured Ferroelectrics	→ Microwave/Radar Components (Circulators, Filters, etc.)
Low Loss, High Permeability Ferrite Composites	→ Inductors, Capacitors for Power Electronics
Exchange Biased Permanent Magnet Composites	→ Electric Drive/Propulsion
High Temperature, Soft Magnet Composites	→ High Temperature, Motor Components (Rotor, Stator, etc.)
Left-Handed Composites	→ Antennas, Communications, Frequency Selective Surfaces
Super Radiant Emitting Structures	→ Thermal Management

ภาพที่ 1 ประเภทของ Metamaterials กับการประยุกต์ใช้วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ในด้านต่างๆ

การศึกษา วิเคราะห์ ทำความเข้าใจหลักการทางกายภาพ (Physics) รวมถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้า (Electric and Electromagnetic Properties) ของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ เช่น Chirality, Isotropy, Bi-anisotropy, Negative Refractive Index จะทำให้เข้าใจพฤติกรรมและผลตอบสนองจากวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ซึ่งเป็นศาสตร์ใหม่ได้ดียิ่งขึ้น การพัฒนา และปรับปรุงโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ให้มีคุณสมบัติเป็นตามเงื่อนไข และความต้องการของอุปกรณ์ไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้า จะสามารถช่วยพัฒนาคุณสมบัติทางไฟฟ้า และแม่เหล็กไฟฟ้า อาทิเช่น ความกว้างของสัญญาณ (Bandwidth) และ การสูญเสีย (Loss) ของอุปกรณ์ดังกล่าวข้างต้นได้ ยิ่งไปกว่านั้น จากคุณสมบัติ

พิเศษเพิ่มเติมของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ จะช่วยให้สามารถสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่เคยปรากฏว่าสร้างได้ให้เป็นจริงได้ เช่น Perfect Lenses และ Cloaking Objects รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์กับองค์ความรู้



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ (Metamaterials) กับ ทฤษฎี/โมเดล (Theory/Modeling), การสังเคราะห์ใหม่ๆ (Novel Synthesis) และ การประยุกต์ใช้ (Applications)

2. วัตถุประสงค์

- 2.1 ศึกษาค้นคว้าหาคุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กสังเคราะห์ที่เหมาะสมกับการนำมาประยุกต์และช่วยปรับปรุงอุปกรณ์และวัสดุไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้าเช่น วัสดุเคลือบ (Coating Materials), เครื่องกรองสัญญาณ (Filters), ตัวเซ็นเซอร์ (Sensors), สายอากาศ (Antenna), เลนส์ (Lens), โยแก้วนำแสง (Fiber Optics)
- 2.2 พัฒนาและออกแบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสังเคราะห์แบบใหม่ที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในช่วงความถี่ไมโครเวฟ

3. ระเบียบวิธีวิจัย

- 3.1 ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ ที่สามารถนำมาพัฒนาและประยุกต์ใช้ด้านไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ไมโครเวฟ เช่น วัสดุเคลือบ (Coating Materials), เครื่องกรองสัญญาณ (Filters), ตัวเซ็นเซอร์ (Sensors), สายอากาศ (Antenna), เลนส์ (Lens) โยแก้วนำแสง (Fiber Optics)
- 3.2 ออกแบบโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กสังเคราะห์ แบบต่างๆ ให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ เพื่อเป็นตัวอย่างและสามารถนำไปใช้ในงานประยุกต์ด้านไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้าได้
- 3.3 เขียนโปรแกรมโดยวิธี Finite-Difference Time-Domain (FDTD) โดยใช้ Matlab เพื่อ Simulate โครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กสังเคราะห์ ที่ออกแบบไว้แล้วตามทฤษฎี
- 3.4 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางทฤษฎี และจาก Computer Simulation
- 3.5 สร้างโครงสร้างต้นแบบ และทำการวัดเพื่อตรวจสอบผลจากการทดลองจริง
- 3.6 เปรียบเทียบผลที่ได้ในการทดลองกับผลจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎี และ Computer Simulation
- 3.7 สรุปและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการวิจัย
- 3.8 ทำรายงานผลงานวิจัย

[illegible]

	ที่เลือกจากการออกแบบใน ปีที่ 1												
2.	สร้างโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กสังเคราะห์ (Fabrication)												
3.	สร้างโครงสร้างต้นแบบ ทั้งแบบ Stack Wedge และ Triangle และทำการวัดคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้า ใน Free Space												
4.	เปรียบเทียบผลที่ได้ในการทดลองกับผลจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎี และ Computer Simulation												
5.	จากการเปรียบเทียบในข้อ 4., Optimize โครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กสังเคราะห์ ซึ่งอาจต้องสร้างโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กสังเคราะห์, โครงสร้างต้นแบบเพื่อทำการตรวจวัดใหม่												
6.	สรุปผลและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการวิจัย ทำรายงานผลการวิจัย และส่งผลงานเพื่อตีพิมพ์ในวารสาร												

5. ผลงาน/หัวข้อเรื่องที่คาดว่าจะตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติในแต่ละปี

ปีที่ 1

ชื่อเรื่องที่คาดว่าจะตีพิมพ์ **Development of Novel Structures for (Chiral Isotropic) Metamaterials**

ชื่อวารสารที่คาดว่าจะตีพิมพ์ **IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND**

PROPAGATION มี Impact factor = 1.5 หรือ **Progress in Electromagnetic Research (PIER)** หรือ

Journal of Electromagnetic Waves and Applications (JEMWA) มี Impact factor = 0.3

ปีที่ 2

ชื่อเรื่องที่คาดว่าจะตีพิมพ์ **Novel (Chiral Isotropic) Metamaterials: Analysis and Experiment**

ชื่อวารสารที่คาดว่าจะตีพิมพ์ **IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND**

PROPAGATION มี Impact factor = 1.5 หรือ **Progress in Electromagnetic Research (PIER)** หรือ

Journal of Electromagnetic Waves and Applications (JEMWA) มี Impact factor = 0.3

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
หน้าสรุปโครงการ	ค
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ประวัติและความเป็นมา	5
2.2 ประเภทของวัสดุเหนือธรรมชาติ	11
2.3 คุณลักษณะพิเศษทางฟิสิกส์และไฟฟ้าของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์	14
2.4 การเคลื่อนที่ของคลื่นในวัสดุที่มีค่าความซาบซึมได้ทางแม่เหล็กและค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเป็นลบ	16
2.5 การประยุกต์ใช้วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์	20
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	
3.1 การจำแนกประเภทของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์	27
3.2 ไครอลลิติ	28
3.3 ประเภทของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์	29
3.4 ทฤษฎีกลุ่ม	30
3.5 ออกแบบโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีกลุ่ม	32
3.6 ทำการตรวจสอบคุณสมบัติไครอลด้วยวิธีการวัดความต่อเนื่องของลักษณะสมมาตร	36
3.7 เปรียบเทียบค่าดัชนีไครอลริติของโครงสร้าง C_3 - C_8	37
3.8 การออกแบบดัชนีการหักเหของแสงติดลบโดยใช้หลักการวิเคราะห์วงจร	39
3.9 โปรแกรมจำลองชั้นเชื่อมสมบูรณ์แบบสามมิติด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา	41
บทที่ 4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล	
4.1 ลักษณะของแขนย่อย (H2) ต่อลักษณะการส่งผ่านของสัญญาณ	45
4.2 การศึกษาความสัมพันธ์ของคุณสมบัติไอโซทรอปิกของการจัดวางโครงสร้างกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	49
4.3 ค่าความจุไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีผลต่อตำแหน่งของค่ายังผลของพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า	58
4.4 โครงสร้างอื่นๆในกลุ่ม C_n	64
4.5 วิเคราะห์ผลการศึกษาและการออกแบบ	69
4.6 การสร้างและผลการทดลองวัสดุต้นแบบ	71

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

74

5.2 ข้อเสนอแนะ

75

บรรณานุกรม

76

Output ที่ได้จากโครงการวิจัย

82

ภาคผนวก

83

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 การจำแนกประเภทของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงซ้อน	28
ตารางที่ 3.2 ประเภทของวัสดุไปไอโซทรอปิก	30
ตารางที่ 3.3 กลุ่มโครงสร้างที่ถูกจัดในกลุ่มชนิดของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงซ้อน	32
ตารางที่ 4.1 แสดงช่วงความถี่ที่เกิดแถบผ่านของดัชนีหักเหของแสงติดลบของโครงสร้าง C_3 ในการจัดวางที่มุม 0, 12, 42, 83, 95 และ 120 องศา	54
ตารางที่ 4.2 แสดงช่วงความถี่ที่เกิดแถบผ่านของดัชนีหักเหของแสงติดลบของโครงสร้าง C_3 ในการจัดวางที่มุม 5, 10, 12, 14 และ 18 องศา	57
ตารางที่ 4.3 แสดงช่วงความถี่ที่เกิดแถบผ่านของดัชนีหักเหของแสงติดลบของโครงสร้าง C_3 ในการจัดวางที่มุมต่างๆ	58
ตารางที่ 4.4 แสดงขนาดของพารามิเตอร์ต่างๆของ โครงสร้างในกลุ่ม C_3 - C_8 ที่ได้การออกแบบ	66
ตารางที่ 4.5 แสดงช่วงความถี่ที่เกิดแถบผ่านของดัชนีหักเหของแสงติดลบของโครงสร้าง C_3 - C_8	69

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1.1 โครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ที่กระทำและมีปฏิกิริยากับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	1
ภาพที่ 1.2 ตัวอย่าง (ก) โครงสร้างเส้นลวด ในยุคเริ่มต้นในปี ค.ศ.2001 แสดงโครงสร้างเส้นลวดและโครงสร้างตัวสั้นพ้องแบบวงแหวนแยกส่วน และ (ข) ภาพแสดงการเคลื่อนที่ของแสงเมื่อผ่านวัสดุที่มีค่าดัชนีหักเหที่มีค่าติดลบ	3
ภาพที่ 1.3 (ก) วัสดุช่องหนา และ (ข) ภาพแสดงผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์วัสดุช่องหนา	3
ภาพที่ 2.1 โครงสร้างคาบจากการจัดเรียงตัวของเส้นลวดทองแดง (Copper Wire) ที่มีความยาวเป็นอนันต์ให้อยู่ในรูปร่างทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์	7
ภาพที่ 2.2 ตัวสั้นพ้องแบบวงแหวนแยกส่วน (Split Ring Resonator, SRR) (ก) 2 และ (ข) 3 มิติ	8
ภาพที่ 2.3 ค่ายังผลของค่าความขบขี้มได้ของสนามแม่เหล็กของโครงสร้าง SRR ซึ่งถูกควบคุมโดยค่าความถี่สั้นพ้องของค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างแผ่นของ SRR และตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่เกิดในโครงสร้าง	9
ภาพที่ 2.4 (ก) วัสดุเหนือธรรมชาติโดยทำการรวมโครงสร้าง SRR และ Copper Wire และ (ข) กราฟแสดงผลการวัดค่าดัชนีการหักเหของแสงที่เปรียบเทียบระหว่างวัสดุเหนือธรรมชาติจริงที่ออกแบบให้มีค่าดัชนีการหักเหของแสงติดลบ, เทฟลอน และวัสดุเหนือธรรมชาติในทางทฤษฎี	9
ภาพที่ 2.5 โครงสร้าง (ก) Capacitively Loaded Strips (CLSs) และ (ข) โครงสร้างตัวสั้นพ้องแบบวงแหวนแยกส่วนที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม	10
ภาพที่ 2.6 (ก) โครงสร้างและ (ข) วงจรไฟฟ้าของโครงสร้างตัวสั้นพ้องแบบวงแหวนแยกส่วน	10
ภาพที่ 2.7 ตัวอย่างการวิเคราะห์ห้วงจรของโครงสร้าง Y	11
ภาพที่ 2.8 ทิศทางการเคลื่อนที่ของพลังงานและทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นในการเคลื่อนที่ในตัวกลางที่เป็นวัสดุเหนือธรรมชาติที่ประพุดตัวเป็นวัสดุ Right-Handed และ Left-Handed	19
ภาพที่ 2.9 ผลกระทบเชเรนคอฟ (A.) ในตัวกลางที่ $n > 0$, (B.) ในตัวกลางที่ $n < 0$	20
ภาพที่ 2.10 เส้นทางการสะท้อนของลำแสงที่รอยต่อของสุญญากาศ ($n > 0$) และตัวกลางที่มี (A) ค่า $n > 0$, และ (B) - $n < 0$	21
ภาพที่ 2.11 ความสามารถของเลนส์สมบูรณ์หรือ Perfect Lens ที่สามารถจับภาพที่ต้องการความละเอียดสูง	22
ภาพที่ 2.12 วัสดุช่องหนาและผลการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบระหว่างวัตถุที่ห่อไว้ด้วยวัสดุช่องหนาและไม่ได้ห่อด้วยวัสดุช่องหนา	23
ภาพที่ 2.13 ตัวกรองไมโครสตริป และ ผลการทดลองเปรียบเทียบ S_{11} และ S_{21} ระหว่างตัวกรองไมโครสตริปที่มี CSRR และไม่มี CSRR	24

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 2.14 แสดงการนำเอาวัสดุเหนือธรรมชาติมาประยุกต์ใช้กับสายอากาศแบบแถวลำดับ	25
ภาพที่ 2.15 แสดงการนำเอาโครงสร้างรูปตัว S มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมทิศทางของการส่งสัญญาณที่ผิวของโดมเรดาร์	26
ภาพที่ 3.1 แสดงวัตถุ (a) ที่มีคุณสมบัติโครอลลิติ และ (b) ไม่มีคุณสมบัติโครอลลิติ	29
ภาพที่ 3.2 ตัวอย่างส่วนประกอบสมมาตร	31
ภาพที่ 3.3 แผนภาพที่ใช้ในการจัดกลุ่มโครงสร้าง	32
ภาพที่ 3.4 โครงสร้างของกลุ่มไบโอโซทรอปิกซึ่งประกอบด้วยกลุ่ม T, O และ I	33
ภาพที่ 3.5 แผนภาพแสดงเชื่อย่อยของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงซ้อน	34
ภาพที่ 3.6 โครงสร้างในของกลุ่ม C_{3-8}	34
ภาพที่ 3.7 โครงสร้างของ C_3	35
ภาพที่ 3.8 โครงสร้างของ C_6	36
ภาพที่ 3.7 วิธีหาค่าดัชนีโครอลลิติด้วยวิธีการวัดความต่อเนื่องของลักษณะสมมาตร	37
ภาพที่ 3.8 การเปลี่ยนแปลงมุม B ของโครงสร้างของ C_4	38
ภาพที่ 3.9 การเปรียบเทียบค่าดัชนีโครอลลิติของโครงสร้าง C_3-C_8 (a) วิธีการวัดความต่อเนื่องของลักษณะสมมาตร และ (b) วิธีแบ่งครึ่งมุมสมมาตร	39
ภาพที่ 3.10 แสดงการกำหนดจุดที่ใช้ในการคำนวณหาค่าโครอลลิติด้วยวิธี (a) วิธีการวัดความต่อเนื่องของลักษณะสมมาตร และ (b) วิธีแบ่งครึ่งมุมสมมาตร	39
ภาพที่ 3.11 โครงสร้างของ C_n ที่ออกแบบและวงจรรวมของโครงสร้างที่หาจากทฤษฎีการวิเคราะห์วงจร	40
ภาพที่ 3.12 ผลการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ที่ช่วงเวลาที่ (a) 34, (b) 38 (c) 52, (d) 88, (e) 134 และ (f) 294	43
ภาพที่ 3.13 ผลการการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบโปรแกรม	44
ภาพที่ 4.1 แสดงโครงสร้างในกลุ่มของ C_3 ที่ได้ทำการออกแบบที่มีแขนย่อย H2 (a) โค้ง (b) ตรง	47
ภาพที่ 4.2 แสดงค่ายังผลของพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า, ค่าความซาบซึ่มได้ทางแม่เหล็ก, ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า และ ดัชนีการหักเหของแสงของโครงสร้าง C_3 ที่มีแขน H2แบบตรง	48
ภาพที่ 4.3 แสดง (a) ลักษณะของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและสะท้อน (S_{21} และ S_{11}), (b) ค่าดัชนีหักเหของแสง (n) (c) ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า, (d) ค่าความซาบซึ่มทางแม่เหล็ก และ (e) อัตราการสูญเสียสัญญาณของโครงสร้าง C_3 แบบที่มีแขน H2 ตรง (Straight) และแขน โค้ง (Curved)	49

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.4 แสดงลักษณะสมมาตร ($1 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 3$ และ $3 \rightarrow 1$) ของโครงสร้าง C_3 พร้อมกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ($\mathbf{k}$) และ สนามแม่เหล็ก ($\mathbf{H}$) และสนามไฟฟ้า ($\mathbf{E}$)	51
ภาพที่ 4.5 แสดงการจัดวางโครงสร้าง C_3 ในมุมที่แตกต่างกัน 6 มุม จาก 0 ถึง 120 (a) 0 องศา, (b) 12 องศา, (c) 42 องศา, (d) 83 องศา (e) 95 องศา และ (f) 120 องศา	52
ภาพที่ 4.6 แสดง (a) พารามิเตอร์ S_{21} , (b) ส่วนจำนวนจริงของดัชนีการหักเหของแสง, (c) ส่วนจริงของ μ , (d) ส่วนจริงของ ε และ (e) อัตราการสูญเสียสัญญาณของการจัดวางโครงสร้าง C_3 ทั้ง 6 มุมที่แสดงในภาพที่ 3.4	53
ภาพที่ 4.7 การจัดวางโครงสร้าง C_3 ที่มุมต่างๆตั้งแต่ 5 องศา ถึง 18 องศา (a) 5 องศา, (b) 10 องศา, (c) 12 องศา, (d) 15 องศา และ (f) 18 องศา	55
ภาพที่ 4.8 แสดง (a) พารามิเตอร์ S_{21} , (b) ส่วนจำนวนจริงของดัชนีการหักเหของแสง (n), (c) ส่วนจริงของ μ , (d) ส่วนจริงของ ε และ (e) อัตราการสูญเสียของสัญญาณของการจัดวางโครงสร้าง C_3 ทั้ง 5 มุมที่แสดงในภาพที่ 4.7	56
ภาพที่ 4.9 แสดงการจัดวางโครงสร้างที่มีการจัดวางแตกต่างกันของโครงสร้าง C_3 ที่มีลักษณะการจัดวางที่เป็นเรขาคณิต (a) 65 องศา, (b) 69 องศา, (c) 71 องศา, (d) 73 องศา, (e) 78 องศา, (f) 18 องศา, (g) 14 องศา, (h) 12 องศา, (i) 10 องศา และ (j) 5 องศา.	57
ภาพที่ 4.10 ลูกศรที่ชี้จะแสดงถึงทิศทางของการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังโครงสร้าง (a) ทัวไปใน 2 มิติ, (b) C_3 ใน 2 มิติ (c) ทัวไปใน 3 มิติ และ (d) C_3 ใน 3 มิติ ที่มีคุณสมบัติไอโซทรอปิกที่สามารถทำให้เกิดผลลัพธ์ที่เหมือนกัน	58
ภาพที่ 4.11 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของโครงสร้าง (a) Continuous Wire, (b) I-Shape และ (c) Discontinuous wire	59
ภาพที่ 4.12 โครงสร้าง C_3 ที่มีอัตราความยาวของแขน $H2:H1$ ในขนาด $H2:H1$ เท่ากับ (a) 1.50 (b) 1.33, (c) 1.00, (d) 0.75 and (e) 0.50 ในทิศทางที่ $\mathbf{k}$ ขนานกับ Mirror Line และ (f) 1.50 (g) 1.33, (h) 1.00, (i) 0.75 และ (j) 0.50 ในทิศทางที่ $\mathbf{k}$ ตั้งฉากกับ Mirror Line	60
ภาพที่ 4.13 แสดงค่ายังผลของพารามิเตอร์ของโครงสร้าง C_3 เมื่ออัตราส่วนของ $H2:H1$ มีการเปลี่ยนแปลง ในทิศทางที่ $\mathbf{k}$ ขนานกับ Mirror Line (a) ส่วนจำนวนจริงของ ε และ (b) ส่วนจำนวนจริงของ μ	62
ภาพที่ 4.14 แสดงค่ายังผลของพารามิเตอร์ของโครงสร้าง C_3 เมื่ออัตราส่วนของ $H2:H1$ มีการเปลี่ยนแปลง ในทิศทางที่ $\mathbf{k}$ ตั้งฉากกับ Mirror Line (a) ส่วนจำนวนจริงของ ε และ (b) ส่วนจำนวนจริงของ μ	62

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.15 แสดงองค์ประกอบของโครงสร้าง C_3 ซึ่งประกอบด้วยแกนหลัก H1 แกนย่อย H2 และแกนเสริม H3	63
ภาพที่ 4.16 แสดงโครงสร้าง C_3 ที่มีแกน H3 เมื่อ H3 มีขนาดเท่ากับ (a) 0, (b) H1:2.5, (c) H1:2.25, (d) H1:2, (e) H1:1.75 และ (f) H1:1.5 พร้อมกับ S_{21} ส่วนจำนวนจริงของดัชนีการหักเหของแสง ε , μ	64
ภาพที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบของ (a) ค่าพารามิเตอร์ S_{21} (b) ส่วนจำนวนจริงของ ε และ (c) ส่วนจำนวนจริงของ μ ของโครงสร้าง C_3 ที่มีการเพิ่มแกน H3 ที่ขนาดต่างๆกัน	65
ภาพที่ 4.18 แสดงโครงสร้างของในกลุ่มของ C_3 - C_8 ที่ได้รับการออกแบบ	66
ภาพที่ 4.19 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของสัญญาณ (S_{21}), ส่วนจำนวนจริงของค่า ε และ μ และอัตราการสูญเสียของสัญญาณของโครงสร้าง (a) C_3 , (b) C_4 (c) C_5 , (d) C_6 (e) C_7 และ (f) C_8	67

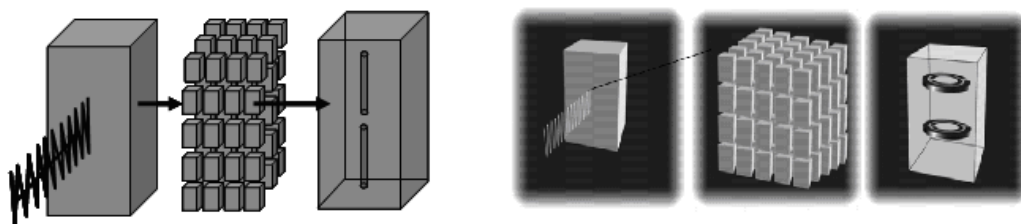
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วัสดุโดยทั่วไปจะกระทำและมีปฏิกิริยากับแสงและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งโดยปกติแสงจะมีพฤติกรรม “ด้านมือเดียว” หรือ One-Handed นั่นคือเมื่อแสงมีการกระทำกับอะตอมของวัสดุตามธรรมชาติทั่วไป จะมีเพียงสนามไฟฟ้า (Electric Field) ที่มีผลกับอะตอมของวัสดุนั้น ในขณะที่สนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) จะมีผลน้อยมากจนเกือบจะไม่มีเลยเนื่องจากโดยปกติสนามแม่เหล็กจะมีค่าอ่อน [1]

วัสดุเหนือธรรมชาติ หรือ เมตาแมททีเรียล (Metamaterials) เป็นโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ที่มีคุณสมบัติคล้ายกับตัวสั่นพ้อง (Resonator) ซึ่งจะทำให้เกิดการสั่นพ้อง (Resonance) ในช่วงความถี่ที่ได้ทำการออกแบบไว้ วัสดุเหนือธรรมชาติถูกสร้างขึ้นโดยมนุษย์ เพื่อกำหนดและควบคุมคุณสมบัติพิเศษทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetics) ซึ่งไม่สามารถพบได้ในวัสดุหรือสารที่เกิดหรือพบตามธรรมชาติ (Naturally-Formed Substances) ทำให้เกิดปรากฏการณ์ใหม่ นำพาไปสู่การประยุกต์ใช้ทางแสงที่สำคัญ ที่ถูกคาดการณ์ว่าจะเป็นประตูสู่วิทยาการวัสดุศาสตร์ในอนาคต หนึ่งในคุณสมบัติมหัศจรรย์ของวัสดุเหนือธรรมชาติคือ ค่าดัชนีการหักเหของแสงที่ติดลบ เมตาแมททีเรียลมีลักษณะเป็นโครงสร้างรวมแบบคาบ (Periodic structures) ประกอบด้วยโครงสร้างย่อย (Individual Structures) มีขนาดเล็กประมาณ 5-10 เท่าของความยาวคลื่นของคลื่นในย่านที่ใช้งาน ขนาดของโครงสร้างที่เล็กนี้ทำให้วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์แสดงคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous Property) โดยเมื่อคาบของโครงสร้างแฉวลำดับและความยาวคลื่นอยู่ในความสัมพันธ์ที่เหมาะสมจะประพฤติตัวเป็นโมเลกุลสังเคราะห์ (Artificial Molecule) ที่จะมียุทธศาสตร์การกระทำร่วมกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 1.1 วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ที่ได้ถูกออกแบบโครงสร้างอย่างเหมาะสม จะสามารถทำให้ตัวประกอบของทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเชื่อมรวมกับเมทาอะตอม (Meta-Atoms) จากปกติที่วัสดุในธรรมชาติจะมีเฉพาะตัวประกอบของสนามไฟฟ้าที่สามารถปฏิสัมพันธ์กับอะตอมของวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้เกิดคุณสมบัติใหม่ทางด้านแสง เช่น แสงสองด้านมือ (Two-Handed Light) และ ดัชนีหักเหของแสงที่มีค่าติดลบ (Negative Refractive Index) เป็นต้น



ภาพที่ 1.1 โครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ที่กระทำและมีปฏิกิริยากับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [1]

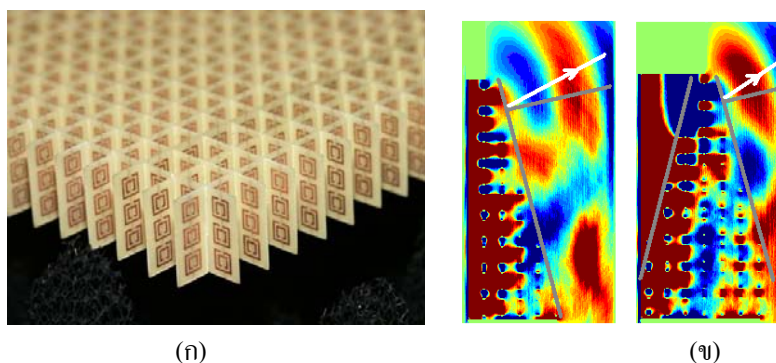
คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและวัสดุโครงสร้างจะเกิดปฏิสัมพันธ์ที่ทั้งเสริมและหักล้างกัน ทำให้วัสดุเกิดพฤติกรรมแถบช่องว่าง (Stop Band) ทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยปฏิสัมพันธ์ทั้งสองสามารถใช้เพื่อกำหนดค่าสภาพยอม (Effective Permittivity) และค่าความซบซึ่มประสิทธิผล (Effective Permeability) ของวัสดุให้อยู่ในช่วงที่ปกติไม่สามารถทำได้ง่ายหรืออาจเป็นค่าที่ไม่มีอยู่ในวัสดุธรรมชาติได้ ด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ถูกจัดเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ค้นพบแห่งปีจากนิตยสารไซน์ (Science) ในปี ค.ศ. 2003

เนื่องด้วยลักษณะความแตกต่างทางกายภาพของโครงสร้างที่ ออกแบบจะทำให้โครงสร้างนั้นๆ มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป โดยที่คุณสมบัติพิเศษของเมตาแมททีเรียลที่เกี่ยวกับทางแม่เหล็กไฟฟ้านั้นมีดังเช่น ดัชนีการหักเหของแสงติดลบ (Negative Index of Refraction) [2] และ ไครอลิตี (Chirality) [3]

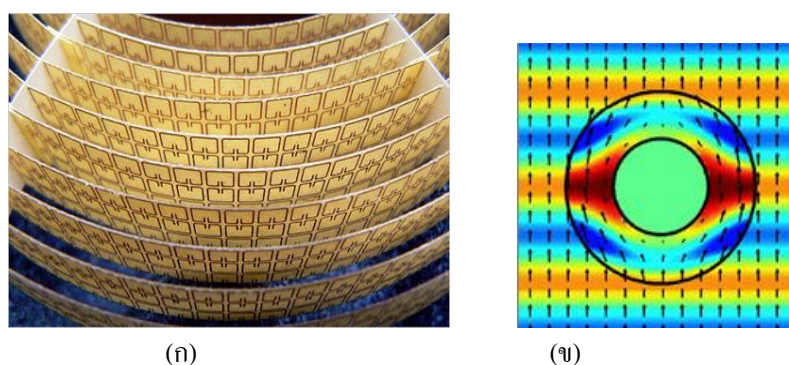
วัสดุเหนือธรรมชาติสามารถจัดจำแนกกลุ่มบนพื้นฐานของคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบด้วย

1) ค่าสภาพยอมของสนามไฟฟ้า (Permittivity (ϵ)) และค่าความซบซึ่มได้ของสนามแม่เหล็ก (Permeability, (μ)) มีค่าน้อยกว่าศูนย์ (Double Negative ϵ and μ), 2) ค่าสภาพยอมของสนามไฟฟ้าหรือค่าความซบซึ่มได้ของสนามแม่เหล็กมีค่าน้อยกว่าศูนย์ (Single Negative ϵ or μ) และ 3) ไครอล (Chiral) วัสดุที่มีคุณสมบัติไครอลิตีจะมีเทนเซอร์ (Tensors) ตัวประกอบแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการเชื่อมรวม (Coupling) ระหว่างสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าหรือว่าเทอมของโพลาไรเซชันไขว้ หรือ Cross-Polarization (ξ, ζ) นั้นเอง

หลังจากที่มีการค้นพบเมตาแมททีเรียลเป็นต้นมาก็ได้มีการคิดค้น และพัฒนาโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์อย่างต่อเนื่อง โดยเริ่มจากการศึกษาโครงสร้างเส้นลวด (Wire), โครงสร้างตัวสั้นพ้องแบบวงแหวนแยกส่วน (Split Ring Resonator (SRR)) และ โครงสร้างรวมของเมตาแมททีเรียลที่รวมโครงสร้างตัวสั้นพ้องแบบวงแหวนแยกส่วนและโครงสร้างเส้นลวดเข้าด้วยกัน โดยกลุ่มวิจัยของ John Pendry และคณะ จากสถาบันอิมพีเรียล (Imperial College) มหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย ซานดิเอโก (University of California, San Diego, (UCSD)), กลุ่มของ D. R. Smith มหาวิทยาลัยดุ๊ก (Duke University), กลุ่มของ J. A. Kong จากมหาวิทยาลัยเอ็มไอที (Massachusetts Institute of Technology (MIT)), กลุ่มของ N. Katsarakis มหาวิทยาลัยรัฐไอโอวา (Iowa State University) และอื่นๆ ดังได้แสดงในภาพที่ 1.2 และยังได้มีการคิดค้นโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ ที่มีคุณสมบัติไครอลิตีและดัชนีหักเหของแสงที่มีค่าติดลบในโครงสร้างเดียวกัน เพื่อใช้ในอุปกรณ์การตรวจสอบยา (Drug Discovery) เมื่อปี 2006 โดยกลุ่มนักวิจัยของ A. Akyurtlu จากมหาวิทยาลัยแมสซาชูเซตส์ (University of Massachusetts) ประเทศสหรัฐอเมริกา ในรูป 1.3 แสดงการใช้วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์เคลือบเพื่อสร้างวัตถุล่องหน (Invisible Objects) ของกลุ่มนักวิจัยจากสถาบันอิมพีเรียลประเทศอังกฤษ, มหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย ซานดิเอโก, มหาวิทยาลัยดุ๊ก และ มหาวิทยาลัยเพนซิลวาเนีย (University of Pennsylvania) ประเทศสหรัฐอเมริกาในปี ค.ศ. 2007 อย่างไรก็ตามการศึกษาวัดแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ยังคงอยู่ในระดับเริ่มต้น และยังมีช่องว่างให้ศึกษาและพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น วัสดุเคลือบ (Coating Materials), เครื่องกรองสัญญาณ (Filters), ตัวเซ็นเซอร์ (Sensors), สายอากาศ (Antenna), เลนส์ (Lens), ใยแก้วนำแสง (Fiber Optics) รวมถึงสร้างอุปกรณ์ใหม่ๆ



ภาพที่ 1.2 ตัวอย่าง (ก) โครงสร้างเส้นลวด ในยุคเริ่มต้นในปี ค.ศ.2001 แสดงโครงสร้างเส้นลวดและโครงสร้างตัวสั้นพ้องแบบวงแหวนแยกส่วน และ (ข) ภาพแสดงการเคลื่อนที่ของแสงเมื่อผ่านวัสดุที่มีค่าดัชนีหักเหที่มีค่าติดลบ



ภาพที่ 1.3 (ก) วัสดุโค้งงอ และ (ข) ภาพแสดงผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์วัสดุโค้งงอ [5]

การศึกษาวิเคราะห์ ทำความเข้าใจหลักการทางกายภาพ (Physics) รวมถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้า (Electric and Electromagnetic Properties) ของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ เช่น ไครอลลิตี (Chirality), ไอโซทรอปิก ไบแอนไอโซทรอปิก (Isotropy, Bi-anisotropy) และ ค่าดัชนีการหักเหของแสงติดลบ (Negative Refractive Index) จะทำให้เข้าใจพฤติกรรมและผลตอบสนองจากวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ซึ่งเป็นศาสตร์ใหม่ได้ดียิ่งขึ้น การพัฒนา และปรับปรุงโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ให้มีคุณสมบัติเป็นตามเงื่อนไข และความต้องการของอุปกรณ์ไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้า จะสามารถช่วยพัฒนาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้า อาทิเช่น ความกว้างของสัญญาณ (Bandwidth) และ การสูญเสีย ของสัญญาณ (Loss) ของอุปกรณ์ดังกล่าวข้างต้นได้ยิ่งไปกว่านั้น จากคุณสมบัติพิเศษเพิ่มเติมของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ จะช่วยให้สามารถสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่เคยปรากฏว่าสร้างได้ให้เป็นจริงได้ เช่น เลนส์สมบูรณ์ (Perfect Lenses) [4] และวัสดุล่องหน (Cloaking Objects) [5]

โครงการวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ประเภท ไครอล ไอโซทรอปิก ที่มีดัชนีการหักเหของแสงติดลบ (Chiral Isotropic Negative Refractive Index Metamaterials) ซึ่งคุณสมบัติไครอลลิคนี้จะใช้อย่างแพร่หลายในการนำไปใช้และนำไปห่อหุ้ม (Coating) ในวัสดุและเครื่องมือที่เราจะนำไปประยุกต์ใช้ เนื่องจากคุณสมบัติที่สามารถควบคุมการโพลาไรเซชันของแสง (Light Polarization) ได้ [6] รวมทั้งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ ในหลายๆด้าน เช่น สายอากาศ (Antenna Radomes) [7], เลนส์ (Lenses) [4], ตัวกรองเชิงแสง (Optical Filters) [8], สายส่งอากาศ (Antennas) [9] และอื่นๆ และคุณสมบัติของวัสดุที่มีค่าดัชนีการหักเหของแสงติดลบ (Negative Index of Refraction) จะมีความสามารถที่จะเบนลำแสงหรือสัญญาณไปในทิศทางตรงกันข้ามจากทิศที่ควรจะเป็น ซึ่งจะนำไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านแสง (Optical) และการเดินทางของคลื่น (Wave Propagation) ประเด็นสำคัญของงานวิจัยนี้อยู่ที่การศึกษา พัฒนา และได้มุ่งเน้นในการออกแบบวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ให้มีคุณสมบัติ ไครอล และ ค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบให้รวมอยู่ในโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นไอโซทรอปิก (Isotropic) เนื่องจากว่าคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุไอโซทรอปิกจะเหมือนกันในทุกทิศทาง (Direction Independence) ไม่ว่าวัสดุถูกกระตุ้นในทิศทางที่ต่างๆ กัน ดังนั้นจึงเป็นการดีหากเราสามารถที่จะทำการออกแบบและสังเคราะห์วัสดุที่มีทั้งคุณสมบัติไครอล, ไอโซทรอปิก และ ค่าดัชนีการหักเหของแสงติดลบไว้ในโครงสร้างเดียวกันได้

ในการศึกษาโครงการวิจัยนี้เราใช้ทฤษฎีกลุ่ม หรือ Group Theory [10-14] เพื่อใช้ในการกำหนดออกแบบ และวิเคราะห์องค์ประกอบทางแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ ทฤษฎีการวิเคราะห์วงจร (Circuit Analysis Theory) [15-16] ถูกนำมาใช้เพื่อออกแบบค่าดัชนีการหักเหของแสงติดลบและได้ใช้วิธีการวัดความต่อเนื่องของลักษณะสมมาตร (Continuous Chiral Measures (CCM)) [17] และวิธีแบ่งครึ่งมุมสมมาตร (Angular Bisection Methods) [18] ใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติไครอลลิคของโครงสร้างทางวัสดุสังเคราะห์ที่ได้ถูกออกแบบและตรวจสอบผลทางทฤษฎีจะถูกนำมาตรวจสอบผลและคำนวณหาค่าองค์ประกอบทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการจำลองผลการทดลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST Microwave Studio® และ วิธีการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์วิธีผลต่างสืบเนื่องทางเวลา (Finite-Difference Time-Domain) โดยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อน (Transmission and Reflection Coefficients, S-Parameter) ที่ได้จากการจำลองการทดลองด้วยโปรแกรมและวิธีประมวลผลข้างต้น จะถูกนำมาคำนวณและสกัด (Extract) ด้วยวิธีโรบัสต์ (Robust Methods) [19] ซึ่งได้ปรับปรุงมาจากวิธีของ Wier เพื่อหาค่าคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าอื่นได้เช่น ค่าดัชนีการหักเหของแสง (Index of Refraction), ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Permittivity, ϵ) และค่าความซาบซึมได้ของสนามแม่เหล็ก (Permeability, μ) [20] และทำการตรวจสอบความถูกต้องของค่าส่วนจริงและส่วนจินตภาพของตัวประกอบเชิงซ้อนดังกล่าวข้างต้นด้วยความสัมพันธ์ของคราเมอร์-โครนิก (Kramers-Kronig Relation) [21]

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประวัติและความเป็นมา

คำว่า “เมตา (Meta)” ในภาษากรีกหมายความว่า “เหนือ” เนื่องจากเมตาเมททีเรียล (Metamaterials) มีคุณสมบัติพิเศษทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) ซึ่งไม่พบในวัสดุหรือสสารที่เกิดหรือพบตามธรรมชาติ จึงอาจกล่าวได้ว่าเมตาเมททีเรียลคือวัสดุที่มีคุณสมบัติเหนือวัสดุพื้นฐานทั่วไป หรือเป็น “วัสดุเหนือธรรมชาติ” อาจกล่าวได้ว่าการศึกษาวัสดุเหนือธรรมชาติเริ่มมีตั้งแต่ปี ค.ศ. 1904 โดย Sir Arthur Schuster และ H. Lamb ซึ่งได้ศึกษาความเร็วเฟสที่ติดลบ (Negative Phase Velocity) [22] หลังจากนั้นในปี ค.ศ. 1968 V. G. Veselago นักวิทยาศาสตร์ชาวรัสเซีย ได้ศึกษาและแสดงผลทางทฤษฎีของคุณสมบัติแสงของวัสดุที่มีดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบ (Negative Refractive Index, $-n$) เนื่องจากวัสดุนั้นๆ มี ส่วนจริงของค่าสภาพยอม หรือ Permittivity (ϵ) และ ส่วนจริงของค่าความซึมได้ หรือ Permeability (μ) มีค่าเป็นลบ [23] โดยได้แสดงว่าวัสดุสามารถมีคุณสมบัติค่าดัชนีการหักเหของแสงติดลบได้โดยได้ทำการอธิบายจากสมการที่ (2.1)

$$n^2 = \epsilon\mu \quad (2.1)$$

หมายเหตุ เนื่องจากค่า μ และ ϵ เป็นจำนวนเชิงซ้อน ส่วนจริง (Real part) ของ ϵ และ μ จะเป็นค่าแสดงสภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุ และ ค่าแสดงค่าความซึมได้ของสนามแม่เหล็ก ในขณะ ส่วนจินตภาพ (Imaginary Part) จะเป็นค่าที่แสดงการสูญเสียที่เกิดขึ้นในสภาวะดังกล่าว ดังนั้นในการศึกษานี้เมื่อกล่าวถึงค่าสภาพยอมและค่าความซึมได้ จะหมายถึงส่วนจริงของ ϵ และ μ

จากสมการที่ (2.1) เราจะสามารถแบ่งพิจารณาออกได้เป็น 3 กรณี คือ

- 1) กรณีที่ค่า ϵ และ μ เป็นบวกทั้งคู่
- 2) กรณีที่ค่า ϵ และ μ เป็นลบทั้งคู่ ซึ่งในกรณีนี้จะขัดแย้งกับวัสดุที่มีอยู่ตามธรรมชาติเนื่องจากว่าวัสดุที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาตินั้น จะไม่มีโอกาสที่ค่า ϵ และ μ จะเป็นลบพร้อมกันได้
- 3) กรณีที่วัสดุมีค่า ϵ หรือ μ เป็นลบ

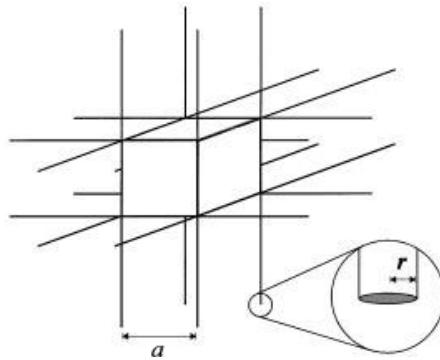
ต่อมาในปี ค.ศ.1996 Sir J.B.Pendry และคณะวิจัยจากสถาบันอิมพีเรียล (Imperial College) ประเทศอังกฤษ ได้สนับสนุนแนวความคิดของศาสตราจารย์ V.G.Veselago โดยได้ทำการทดลองการออกแบบโครงสร้างวัสดุให้มีคุณสมบัติที่ค่า ϵ และ μ เป็นลบ ใช้หลักการการเกิดของพลาสมอน (Plasmon) หรือกลุ่มของอิเล็กตรอนที่เกิดการแกว่งกวัด (Oscillation) จากการกระตุ้นโลหะที่มีความถี่สูงๆ ในย่านที่ตามองเห็น (Visible Region) ใกล้กับช่วงอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet, UV) ซึ่งมีความถี่อยู่ในช่วง 10^{15} Hz โดยความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้

กระตุ้นนั้นจะต้องต่ำกว่าความถี่พลาสมา (ω_p) ของโลหะนั้นจึงจะทำให้โครงสร้างที่สร้างจากโลหะดังกล่าวมีค่า ε เป็นลบตามสมการที่ (2.2) [24]

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)} \quad (2.2)$$

เมื่อ ω_p คือความถี่พลาสมา โดยปกติแล้วจะอยู่ใน ช่วงสเปกตรัมของความถี่ในช่วงอัลตราไวโอเลต, ω คือความถี่ของคลื่นที่สนใจ และ γ คือเทอมของการหน่วงหรือ Damping ที่ใช้ในการอธิบายถึงการแพร่กระจายของพลังงานของพลาสมอนเข้าไปในระบบ

จากหลักการดังกล่าวได้มีการทดลองสร้างเส้นลวดทองแดง (Copper Wire) โดยออกแบบโครงสร้างให้มีลักษณะที่เป็นแบบโครงสร้างคาบ (Periodic Structure) ด้วยการจัดเรียงตัวของเส้นลวดทองแดงที่มีความยาวเป็นอนันต์ให้อยู่ในรูปร่างทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ดังภาพที่ 2.1



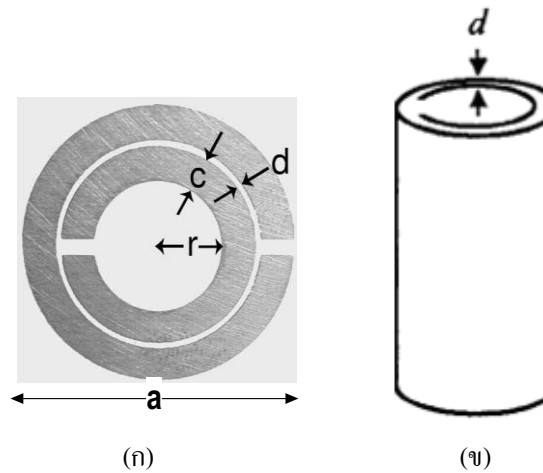
ภาพที่ 2.1 โครงสร้างคาบจากการจัดเรียงตัวของเส้นลวดทองแดง (Copper Wire) ที่มีความยาวเป็นอนันต์ให้อยู่ในรูปร่างทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ [24]

ผลการทดลองแสดงว่าโลหะจะมีคุณสมบัติที่ค่า ε เป็นลบ อยู่ในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่พลาสมา (ω_p) เท่านั้น กลุ่มคณะ วิจัยดังกล่าวยังได้เสนอว่าโครงสร้างที่สร้างด้วยวัสดุประเภทตัวนำที่ไม่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กนั้น (Nonmagnetic Conductor) จะสามารถทำให้แสดงค่ายังผลของค่าความซาบซึมได้ของสนามแม่เหล็ก (Effective Magnetic Permeability (μ_{eff})) และยังสามารถที่จะทำการปรับค่าได้โดยการปรับเปลี่ยนโครงสร้างและได้ทำการทดลองสร้างโครงสร้างให้มีลักษณะที่เป็นแบบโครงสร้างคาบเช่นเดียวกัน โดยใช้โครงสร้างตัวสั้นพ้องแบบวงแหวนแยกส่วน หรือ Split Ring Resonator (SRR) [25] ซึ่งจากการทดลองพบว่า SRR นั้นมีคุณสมบัติที่ทำให้ค่าความซาบซึมได้เป็นลบ โดยการสร้างนั้นมีเงื่อนไขว่าจะต้องสร้างให้โครงสร้าง SRR มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นที่ใช้ในการทดลองมากๆ เพื่อที่สามารถแสดงความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) เมื่อรวมโครงสร้างย่อยเข้าด้วยกัน โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโครงสร้าง SRR จะต้องสอดคล้องกับสมการที่ (2.3) ภาพที่ 2.2 แสดงโครงสร้าง 2 และ 3 มิติของ SRR

$$a \ll \lambda = 2\pi c_0 \omega^{-1} \quad (2.3)$$

สมการที่ (2.4) แสดงค่ายังผลของค่าความซาบซึมได้ของสนามแม่เหล็ก (μ_{eff}) ของโครงสร้าง SRR

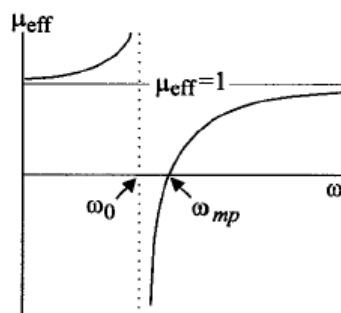
$$\mu_{eff} = 1 - \frac{\frac{\pi r^2}{a^2}}{1 + \frac{i2\sigma}{\omega\gamma\mu_0} - \frac{3dc_0^2}{\pi^2\omega^2 r^3}} \quad (2.4)$$



ภาพที่ 2.2 ตัวสั้นพ้องแบบวงแหวนแยกส่วน (Split Ring Resonator) (ก) 2 และ (ข) 3 มิติ

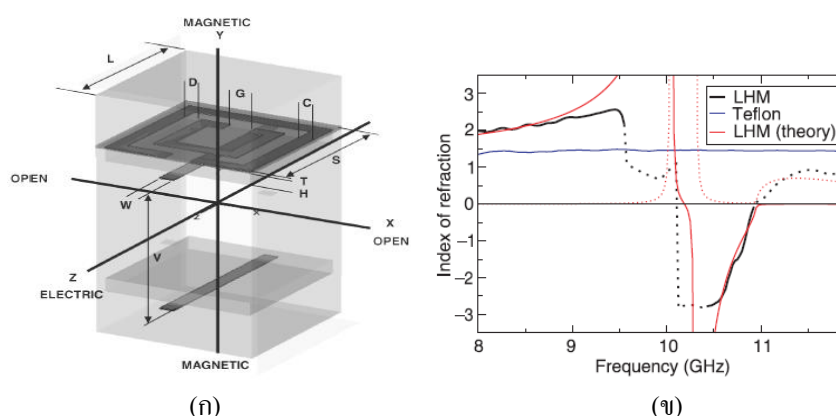
เมื่อ a คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์หน่วย (Unit Cell), c คือ ความหนาของแผ่นตัวนำที่ไม่มีสภาพแม่เหล็ก (Nonmagnetic Conductor) และ d คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ [25]

ภาพที่ 2.3 แสดงทดลองของ Pendry ในปี 1999 ที่ได้ทำการหาค่ายังผลของค่าความซาบซึมได้ของสนามแม่เหล็ก (μ_{eff}) ของโครงสร้าง SRR ซึ่งถูกควบคุมโดยการสั่นพ้อง (Resonance) ของค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) ที่เกิดระหว่างแผ่นของ SRR และตัวเหนี่ยวนำ (Inductance) ที่เกิดในโครงสร้าง ซึ่งพบว่าค่า μ_{eff} นั้นมีค่าติดลบในช่วงที่เหนือจากความถี่สั่นพ้อง (Resonant Frequency, ω_0) แต่ต่ำกว่าความถี่ของการเกิดพลาสมา (Magnetic Plasma Frequency, ω_{mp})



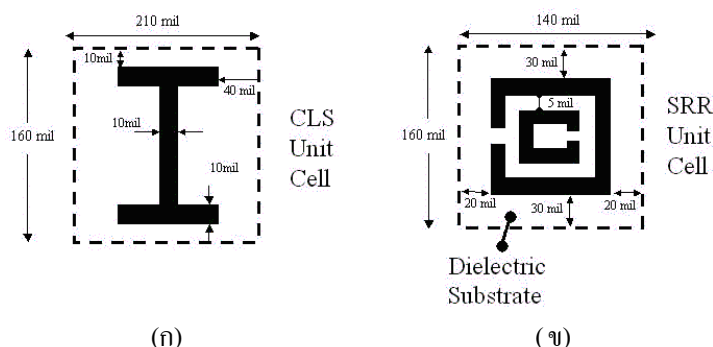
ภาพที่ 2.3 ค่ายังผลของค่าความซาบซึมได้ของสนามแม่เหล็ก (μ_{eff}) ของโครงสร้าง SRR ซึ่งถูกควบคุมโดยค่าความถี่สั่นพ้อง (Resonance) ของค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) ที่เกิดระหว่างแผ่นของ SRR และตัวเหนี่ยวนำ (Inductance) ที่เกิดในโครงสร้าง [25]

จากนั้นจึงได้มีการสร้างวัสดุเหนือธรรมชาติขึ้นมาจริงเป็นครั้งแรก โดย D. R. Smith ในปี ค.ศ. 2000 [2] โดยได้นำแนวความคิดของศาสตราจารย์ V. G. Veselago และ Sir J. B. Pendry มาทำการสร้างและประกอบวัตถุ SRR และ Copper Wire ให้มีโครงสร้างรวมเป็นแบบคาบ (Periodic Structures) จากการทดลองพบว่าจะได้แถบความถี่ผ่าน (Passband) ออกมาในช่วงที่ ϵ และ μ เป็นลบพร้อมกัน โดยแถบความถี่ผ่านนี้คือช่วงที่วัสดุมีค่าดัชนีการหักเหของแสงติดลบ ภาพที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของวัสดุเหนือธรรมชาติที่ประกอบด้วยโครงสร้างของเส้นลวดทองแดง (Copper Wire) และ SRR ที่แสดงทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก และผลการวัดค่าดัชนีการหักเหโดยเปรียบเทียบวัสดุ 3 ประเภท



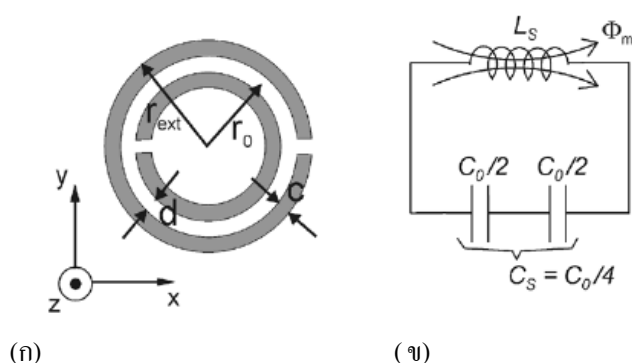
ภาพที่ 2.4 (ก) วัสดุเหนือธรรมชาติโดยทำการรวมโครงสร้าง SRR และ Copper Wire และ (ข) กราฟแสดงผลการวัดค่าดัชนีการหักเหของแสงที่เปรียบเทียบระหว่างวัสดุเหนือธรรมชาติจริงที่ออกแบบให้มีค่าดัชนีการหักเหของแสงติดลบ, เทฟลอน (Teflon) และวัสดุเหนือธรรมชาติในทางทฤษฎี [26]

จากนั้นมาเมตาแมทที่เรียกได้ก็ได้รับความสนใจมากขึ้นจึงได้มีกลุ่มนักวิจัยหลายกลุ่มได้สร้างเมตาแมทที่เรียลที่มีรูปร่างต่างๆ กัน โดยใช้หลักการของ Pendry เช่น ในปี 2003 Richard W. Ziolkowski จากมหาวิทยาลัยอริโซนา (Arizona) ได้สร้างโครงสร้างโดยการประกอบกันของ Capacitively Loaded Strips (CLSs) และโครงสร้างตัวสั้นพ้องแบบวงแหวนแยกส่วนที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม (Square SRRs) [26] ดังแสดงในภาพที่ 2.5 โดย CLSs นั้นจะทำให้เกิด ϵ ที่เป็นลบ และ Square SRRs จะให้ค่า μ ที่เป็นลบ



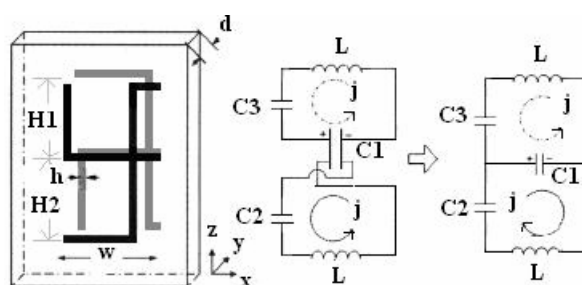
ภาพที่ 2.5 โครงสร้าง (ก) Capacitively Loaded Strips (CLSs) และ (ข) โครงสร้างตัวสั้นพ้องแบบวงแหวนแยกส่วนที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม (Square SRRs) [26]

การวิเคราะห์วงจร (Circuit Analysis) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ได้ถูกนำมาใช้ช่วยในการวิเคราะห์หาช่วงความถี่ที่ทำให้เกิดการสั้นพ้องของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสังเคราะห์ ดังงานของกลุ่มวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเซบิลลา (Sevilla University) จากประเทศสเปน [27-28] ซึ่งได้นำแนวความคิดมาจากกลุ่มของ J. Pendry ในปี 2003 [25] ที่ศึกษาโครงสร้าง SRR และหาสมการคำนวณความถี่สั้นพ้องของโครงสร้าง SRR มาทำการศึกษาเพิ่มเติม ในภาพที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของ SRR และ วงจรไฟฟ้าของ SRR จากกลุ่มของมหาวิทยาลัยเซบิลลา



ภาพที่ 2.6 (ก) โครงสร้างและ (ข) วงจรไฟฟ้าของโครงสร้างตัวสั้นพ้องแบบวงแหวนแยกส่วน [28]

นอกจากนี้การวิเคราะห์วงจร (Circuit Analysis) ยังสามารถนำมาช่วยในการออกแบบรูปทรงของโครงสร้าง เช่น การคำนวณหาค่า ความถี่สั่นพ้องของวงจรตัวเหนี่ยวนำ-ตัวเก็บประจุไฟฟ้า (LC) จากโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ในส่วนที่ต้องการออกแบบให้มี $-\mu$ จะช่วยให้เราสามารถคาดการณ์ตำแหน่งที่โครงสร้างนั้นจะมีค่าดัชนีหักเหของแสงที่มีค่าติดลบที่เกิดจากการคาบเกี่ยว (Overlap) ของ $-\epsilon$ และ $-\mu$ ได้ ดังที่ได้มีการนำเสนอครั้งแรกในปี 2004 จากกลุ่มของ H. Chen โดยได้ทำการออกแบบโครงสร้างรูปตัวเอส (S-shape) ที่ทำให้เกิดค่าดัชนีการหักเหของแสงมีค่าติดลบ (Negative Refractive Index, NRI) ได้ในหนึ่งโครงสร้าง [29] และในเวลาต่อมาในปี 2007 กลุ่มของ Wongkasem ได้ใช้หลักการเดียวกันในการออกแบบโครงสร้างรูปตัววาย (Y-shape) [30]



ภาพที่ 2.7 ตัวอย่างการวิเคราะห์วงจรของโครงสร้าง Y [30]

ภาพที่ 2.7 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์วงจรของโครงสร้าง Y เพื่อคำนวณหาความถี่สั่นพ้องของโครงสร้าง ซึ่งค่า ความถี่สั่นพ้องเป็นตัวแปรสำคัญตัวหนึ่งที่ใช้ช่วยในการออกแบบโครงสร้างของเมตาแมททีเรียลนั้นๆ ให้มีค่าดัชนีการหักเหมีค่าเป็นลบในช่วงความถี่ที่เราต้องการ

นอกจากนี้ยังมีการนำเอาทฤษฎีกลุ่ม หรือ Group Theory และทฤษฎีตำแหน่งกลุ่ม (Point Group Theory) มาช่วยในการออกแบบ ซึ่งได้มีการนำเสนอครั้งแรกโดย W. J. Padilla ในปี 2005 [31-32] โดยได้นำเสนอวิธีในการจัดประเภทและออกแบบโครงสร้างของเมตาแมททีเรียลโดยใช้หลักการของ Group Theory ซึ่งต่อมากลุ่มของ Wongkasem ก็ได้ทำการปรับปรุงวิธีนี้ให้สะดวกต่อการใช้งานมากยิ่งขึ้นในปี 2006 [33-34] ปกติทฤษฎีกลุ่มและทฤษฎีตำแหน่งกลุ่มจะถูกใช้ในการวิเคราะห์ด้วยตัวประกอบสมมูล (Symmetry Components) ของอะตอมในโมเลกุล เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างสังเคราะห์ก็จะสามารถช่วยในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแม่เหล็ก เช่น รูปแบบของแม่เหล็กไฟฟ้าและตัวประกอบของแม่เหล็กได้ ในชั้นแรกวัสดุสังเคราะห์จะถูกจัดกลุ่มตามลักษณะการวางตัวของโครงสร้างทางเรขาคณิต (Geometry Structure) ของกลุ่มที่มีในทฤษฎีกลุ่ม และกลุ่มต่างๆ จะถูกจัดประเภทโดยใช้ค่าของตัวประกอบของแม่เหล็กเชิงซ้อนทั้ง 36 ตัว ที่ได้จากตัวประกอบสมมูล โดยผ่านขั้นตอนการวิเคราะห์การจัดตำแหน่งของโครงสร้าง การตรวจสอบความสมมูลก่อนและหลังการจัดใส่สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในทิศทางต่างๆ

2.2 ประเภทของวัสดุเหนือธรรมชาติ

เนื่องจากประเภทของวัสดุทั้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้นมานั้นมีอยู่จำนวนมาก ในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงประเภทของวัสดุที่สามารถจัดว่าเป็นเมตาแมททีเรียลได้ตามการจัดกลุ่มของ Shivola ในปี 2007 โดยใช้คุณสมบัติของวัสดุและลักษณะของการใช้งานเป็นเกณฑ์ในการจัดประเภท [35] ซึ่งมี 9 ประเภท ดังนี้

2.2.1 วัสดุจำพวกฉนวนไฟฟ้าสังเคราะห์ หรือ วัสดุไดอิเล็กทริก (Artificial Dielectrics)

ในปี 1904 Winston E.Kock ได้ทำการเสนอสายอากาศชนิดใหม่ซึ่งใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติทางแสง โดยการสร้างเลนส์สว่าง (Dielectric Lens Lighter) โดยการนำส่วนผสมของโลหะทรงกลมในเมตริกซ์ไปแทนที่ที่วัสดุเดิมที่ทำการสะท้อนแสงออกจากเลนส์ โดยเขาได้ทำการสร้างเลนส์นี้โดยการพันสารตัวนำลงบนแผ่นโฟมโพลีสไตรีน (Polystyrene Fome Sheets) และแผ่นเซลโลเฟน (Cellophane Sheets) เป็นชั้นๆ ในลักษณะและระยะห่างระหว่างแผ่นที่พอเหมาะซึ่งจะทำให้มีดัชนีการหักเหของแสงที่เหมาะสมกับการใช้งาน [36] ด้วยเหตุนี้เขาจึงอาจเป็นคนที่ค้นพบวัสดุจำพวกฉนวนไฟฟ้าสังเคราะห์ (Artificial Dielectric) เป็นคนแรก ซึ่งต่อมาได้รับการยอมรับให้อยู่ในงานวรรณกรรมด้านไมโครเวฟ [37]

การเรียกชื่อว่าวัสดุจำพวกฉนวนไฟฟ้าสังเคราะห์ (Artificial Dielectric Metamaterials) นั้นทำให้ทราบถึงคุณสมบัติของวัสดุประเภทนี้ได้ชัดเจนขึ้นเนื่องจากว่าคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้าของวัสดุนั้นจะเปลี่ยนคุณสมบัติไปเป็นวัสดุประเภทฉนวนไฟฟ้าเมื่อรวมตัวกันอยู่ในลักษณะของวัสดุที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เป็นเนื้อเดียวกัน เช่นเดียวกับตัวกลางที่ประกอบไปด้วยเส้นลวด (Roded Medium) [38] โดยการนำเสนอในปี 1962 ของ Rotman ซึ่งจะประพุดติตัวคล้ายกับพลาสมาที่มีอิเล็กตรอนอิสระและด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของส่วนประกอบของวัสดุ ซึ่งโครงสร้างของ Roded Medium นี้เองได้เป็นโครงสร้างต้นแบบของ Wire Medium

2.2.2 วัสดุแม่เหล็กสังเคราะห์ (Artificial Magnetics)

เหตุผลที่ทำให้วัสดุแม่เหล็กสังเคราะห์ หรือ Artificial Magnetics สามารถจัดอยู่ในกลุ่มของวัสดุเหนือธรรมชาตินั้นก็คือ คุณสมบัติใหม่ที่ปรากฏในส่วนประกอบ เช่น ผลตอบสนองทางแม่เหล็ก (Magnetic Response) แม้ว่าส่วนประกอบของวัสดุนั้นจะไม่ใช่แม่เหล็กก็ตาม ซึ่งเป็นผลจากการไหลวนของกระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิดสภาพโมเมนต์ของแม่เหล็ก (Magnetic Moment) ผลตอบสนองทางแม่เหล็กจะสามารถเกิดขึ้นได้จากการจัดวางตัวของเส้นลวดตัวนำภายในวัสดุหลัก (Host Matrix) และยังสามารถเกิดได้โดยที่ไม่มีตัวนำไฟฟ้าเลย เมื่อสร้างวัสดุฉนวนไฟฟ้าที่มีลักษณะความไม่เป็นเนื้อเดียวกันเป็นวงจรที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าไหลจะก่อให้เกิดสภาพไดอะแมกเนติก (Diamagnetic Effect) อื่นๆ ได้อีกด้วย

วัสดุแม่เหล็กสังเคราะห์นั้นได้มีการศึกษากันมาเป็นเวลานานแล้วแต่เพิ่งจะได้รับความสนใจมากขึ้นในช่วงศตวรรษนี้เอง ดังเช่นการออกแบบโครงสร้างม้วนแบบสวิส (Swiss Role) และ SRR [39]

2.2.3 วัสดุประเภทไครอล (Chiral Materials)

วัสดุประเภทไครอลเป็นวัสดุอีกประเภทหนึ่งที่มีคุณสมบัติโดดเด่นเมื่อกล่าวถึงวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์เมตาแมททีเรียล วัสดุประเภทไครอลนี้ประกอบไปด้วยส่วนประกอบที่มีลักษณะด้านมือ (Handed Elements) [40] ลักษณะทางกายภาพของส่วนประกอบย่อยในวัสดุประเภทนี้ (ลักษณะอสมมาตร หรือ ไม่มีสมมาตรเมื่อเทียบกับระนาบสะท้อน หรือ Mirror Reflection) จะส่งผลถึงคุณสมบัติของวัสดุไครอลซึ่งจะสามารถสังเกตได้จากการหมุนของการโพลาไรเซชันของระนาบการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า หรืออาจเรียกว่า Optical Rotatory Power ซึ่งเกิดจากเชื่อมร่วมระหว่างสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า หรือ Magnetoelectric Coupling ภายในโครงสร้างย่อยของวัสดุไครอล

วัสดุไครอลสามารถสังเคราะห์ขึ้นได้ด้วยการผสมโลหะเกลียว (Metal Helices) ในลักษณะที่การจัดวางคละเคล้ากันไปโดยไร้รูปแบบโดยที่โลหะเกลียวเหล่านั้นจะต้องมีลักษณะด้านมือในทิศทางเดียวกัน ซึ่งจะทำให้เกิดพลังงานซึ่งเกิดจากการหมุน หรือ Rotatory Power ได้ แต่ในทางตรงข้ามหากว่าผสมโครงสร้างโลหะเกลียวที่มีคุณสมบัติด้านมือที่ตรงข้ามกันในสัดส่วนที่เท่ากัน หรือที่เรียกว่า Racemic Mixture นั้นจะทำให้ได้ผลที่ต่างออกไปจากเดิม โดยคุณสมบัติทางกายภาพของโครงสร้างรวม (Macroscopic) จะยังคงเหมือนเดิมแต่จะไม่ปรากฏพลังงานซึ่งเกิดจากการหมุน

2.2.4 วัสดุแอนไอโซทรอปีและวัสดุไบแอนไอโซทรอปี (Anisotropy and Bi-anisotropy)

วัสดุสังเคราะห์แอนไอโซทรอปี (Anisotropy) เป็นวัสดุอีกประเภทหนึ่งที่ถูกจัดอยู่ในกลุ่มของวัสดุเนื้อธรรมชาติ ซึ่งเกิดจากการผสมโครงสร้างย่อยด้วยวัสดุฉนวนไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นไอโซทรอปีกับตัวกลางอื่นที่มีลักษณะไม่สมมาตร เช่น รูปร่างคล้ายแท่งเข็ม (Needle) วางตัวในแนวเดียวกัน ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะทำให้ผลตอบสนองต่อโครงสร้างมหัพภาคหรือที่สามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Macroscopic) นั้นแตกต่างกันออกไปตามแต่ละลักษณะของสนามที่ส่งเข้ามากระตุ้น Needles ว่าอยู่ในแนวตั้งฉากหรือว่าในทิศทางขนานกับ Needles

ไบแอนไอโซทรอปีเป็นวัสดุที่มีประโยชน์ที่มักใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุเชิงซ้อน (Complex Media) วัสดุประเภทไบแอนไอโซทรอปีนี้จะเป็นการรวมคุณสมบัติของวัสดุประเภทแอนไอโซทรอปีและการเชื่อมร่วมทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetoelectric Coupling) เข้าด้วยกัน ซึ่งจะแตกต่างกับวัสดุประเภทไบไอโซทรอปีก็คือ วัสดุไบไอโซทรอปีจะมีส่วนผสมของวัสดุเกลียว (Helices) ซึ่งคละเคล้ากันอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบ ต่างกับวัสดุประเภทไบแอนไอโซทรอปีที่จะมีการจัดวางตัวของวัสดุเกลียวที่เป็นระเบียบ ซึ่งการจัดวางตัวของวัสดุเกลียวนี้จะส่งผลต่อคุณสมบัติของวัสดุ มหัพภาค ทำให้ผลตอบสนองของวัสดุขึ้นอยู่กับทิศทางของการส่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเข้ามายังวัสดุ [41]

2.2.5 วัสดุของเวเซเลโก (Vesalego Media)

อาจจะกล่าวได้ว่าวัสดุของเวเซเลโก หรือ Vesalego Media นั้นได้รับการกล่าวถึงมากที่สุดในกลุ่มของวัสดุเนื้อธรรมชาติ ซึ่งการได้มาซึ่งชื่อนี้มาจากการนำเสนอของ Viktor G. Vesalego ในปี 1968 ซึ่งกล่าวถึงพฤติกรรมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับวัสดุที่มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและสภาพยอมให้ซาบซึมได้ทางแม่เหล็กเป็นลบพร้อมกัน ($\epsilon < 0$ และ $\mu < 0$) ซึ่งในขณะนั้นเป็นเรื่องที่เหนือธรรมชาติ โดยหลังจากนั้นอีก

ประมาณ 30 ปี จึงได้มีการสนับสนุนว่าแนวความคิดของ Viktor G. Veselego ว่าสามารถทำได้จริงโดยกลุ่มของ Sir J. B. Pendry ในปี ค.ศ. 1996 และ กลุ่มของ Dr. Smith ในปี ค.ศ. 2000 Veselego Media นี้ยังมีชื่อเรียกแตกต่างกันออกไปอีก เช่น Negative Index Media, Negative-Refractive Media, Back-ward Wave Media, Double-Negative Media, Media with Simultaneously Negative Permittivity and Permeability, Negative Phase-Velocity Media, และ Left-Handed Media (LHM) [35]

2.2.6 วัสดุเอกซทรีมพารามิเตอร์ (Extreme-Parameter Media)

วัสดุที่น่าสนใจอีกประเภทหนึ่งที่สามารถแสดงลักษณะพิเศษทางแม่เหล็กไฟฟ้าก็คือ วัสดุเอกซทรีมพารามิเตอร์ (Extreme-Parameter Media) ที่ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า μ และ ϵ ที่มีค่าสูงมากๆ หรือ ต่ำมากๆ ซึ่งในกรณีนี้เราจะพิจารณาเฉพาะที่ μ และ ϵ เป็นบวกทั้งคู่ (Double Positive Material หรือ DPS) เท่านั้น

จากการใช้หลักการทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุประเภทนี้ ทำให้เกิดวัสดุชนิดใหม่ขึ้นมานั่นก็คือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Perfect Electric Conductor หรือ PEC) และตัวนำแม่เหล็กยิ่งยวด (Perfect Magnetic Conductor หรือ PMC) ซึ่งมีลักษณะที่ $\epsilon \rightarrow \infty, \mu \rightarrow 0$ และ $\epsilon \rightarrow 0, \mu \rightarrow \infty$ ตามลำดับ ซึ่งจากคุณสมบัติเหล่านี้จะส่งผลไปถึงค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่น (Wave Impedance) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\eta = \sqrt{\mu/\epsilon}$ และค่าดัชนีการหักเหของแสง $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ ดังนั้น PEC และ PMC จึงมีค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่นสูงมาก แต่ในทางกลับกันจะมีค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็นศูนย์ วัสดุประเภทนี้กำลังเป็นที่สนใจเนื่องจากประโยชน์ของมันเพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้งาน เช่น การเพิ่มค่าไดเรกทิวิตีของสายอากาศแบบระนาบ (Directivity of Plane Antenna) , วัสดุล่องหน (Cloaking Object) และ การบีบอัดพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าและพลังงานทางแสง

2.2.7 วัสดุตัวนำแม่เหล็กไฟฟ้ายิ่งยวด (PEMC Medium)

วัสดุตัวนำแม่เหล็กไฟฟ้ายิ่งยวด หรือ Perfect Electromagnetic Conductor (PEMC Medium) เป็นวัสดุที่เพิ่งจะได้มีการนำเสนอขึ้นมาไม่นานนี้ซึ่งครอบคลุมคุณสมบัติของ PEC และ PMC [42] วัสดุประเภทนี้ส่วนมากจะจัดอยู่ในประเภทไอโซทรอปิก เหตุผลที่ทำให้ PEMC นั้นมีความน่าสนใจคือคุณสมบัติที่ส่งผลต่อคลื่นซึ่งจะนำไปสู่การประยุกต์ใช้งานด้านวิศวกรรมสายอากาศ

2.2.8 ท่อนำคลื่น (Waveguiding Medium)

ไม่เพียงแต่วัสดุประเภท PEC, PMC และ PEMC เท่านั้นที่จะทำปฏิกิริยากับสนามเฉพาะที่บริเวณผิวของวัสดุ แต่ยังมีวัสดุอีกจำพวกหนึ่งที่ทำปฏิกิริยากับสนามด้วยความต้านทานเชิงซ้อนที่พื้นผิวของวัสดุ (Surface Impedance) ประโยชน์ของการใช้ความต้านทานเชิงซ้อนที่พื้นผิวของวัสดุคือสามารถช่วยแก้ปัญหาทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ง่ายขึ้นเนื่องจากสามารถที่จะจำกัดขอบเขตการแก้ปัญหา (Solution Domain) ได้โดยไม่ต้องหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ด้านอื่น ซึ่งวัสดุที่จะนำมาทำเป็นท่อนำคลื่นนั้นควรจะเป็นวัสดุประเภทแอนไอโซทรอปิกที่มีค่า μ และ ϵ สูงๆ ในทิศทางที่ตั้งฉากกับพื้นผิว [43]

2.2.9 ผลึกแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Crystal)

จากการทำวิจัยเรื่องวัสดุสังเคราะห์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้ค้นพบผลึกแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ Electromagnetic Crystal ซึ่งมีชื่อเรียกอีกหลายชื่อ ดังเช่น ผลึกเชิงแสง (Photonic Crystals), โครงสร้างช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Bandgap structures, EBG) และ โครงสร้างช่องว่างทางแสง (Photonic Bandgap Structures, PBG) ผลึกแม่เหล็กไฟฟ้ามีลักษณะเป็นโครงสร้างรวมแบบคาบ (Periodic Structures) ซึ่งประกอบด้วยวัสดุฉนวนไฟฟ้าหรือเส้นลวดตัวนำที่เชื่อมโยงเซลล์หน่วย (Unit Cell) ในแต่ละเซลล์หน่วยเข้าด้วยกัน ซึ่งจะส่งผลต่อการทำปฏิกิริยากับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จึงทำให้ผลึกแม่เหล็กไฟฟ้านั้นแสดงคุณสมบัติที่แตกต่างไปจากเซลล์หน่วย วัสดุประเภทนี้สามารถที่จะส่งผ่านหรือสะท้อนคลื่นสัญญาณได้โดยขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น ขนาดและทิศทางของคลื่นที่ใช้ในการแพร่กระจายคลื่น และเนื่องจากว่า ผลึกแม่เหล็กไฟฟ้านั้นเป็นโครงสร้างที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันเพราะประกอบไปด้วยเซลล์หน่วยอีกหลายเซลล์ ดังนั้นเพื่อที่จะให้โครงสร้างรวมนั้นสามารถทำปฏิกิริยากับคลื่นที่ใช้งาน เซลล์หน่วยนั้นจะต้องมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่น ตัวอย่างวัสดุประเภทนี้คือ โครงสร้างที่ประกอบไปด้วยเส้นลวดตัวนำ (Certain Wire-Structure) [44]

2.3 คุณลักษณะพิเศษทางฟิสิกส์และไฟฟ้าของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์

2.3.1 คุณสมบัติดัชนีการหักเหของแสงติดลบ (Negative Index of Refraction)

จากงานนำเสนอของ V. G. Veselago นักวิทยาศาสตร์ชาวรัสเซีย ได้ศึกษาและแสดงผลทางทฤษฎีของคุณสมบัติแสงของวัสดุที่มีดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบ (Negative Refractive Index, $-n$) เนื่องจากวัสดุนั้นๆ มีค่าสภาพยอม หรือ Permittivity (ϵ) และ ค่าความซาบซึมได้ หรือ Permeability (μ) ติดลบ โดยได้แสดงว่าวัสดุสามารถมีคุณสมบัติค่าดัชนีการหักเหของแสงติดลบได้โดยได้ทำการอธิบายจากสมการที่ (2.1) ซึ่งจะสามารถขยายออกมาให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้ดังสมการที่ (2.5) และ (2.6)

$$\begin{aligned} n &= n_r + in_i \\ \epsilon &= \epsilon_r + i\epsilon_i \\ \mu &= \mu_r + i\mu_i \end{aligned} \quad (2.5)$$

แทนค่าพารามิเตอร์ในสมการที่ (2.5) ลงในสมการที่ (2.1) จะได้สมการดัชนีการหักเหของแสงในรูปจำนวนเชิงซ้อนได้ดังสมการที่ (2.6)

$$\begin{aligned} n^2 &= \epsilon\mu \\ &= n_r^2 - n_i^2 + 2in_r n_i \\ &= \mu_r \epsilon_r - \mu_i \epsilon_i + i(\mu_i \epsilon_r + \mu_r \epsilon_i) \end{aligned} \quad (2.6)$$

เมื่อ ϵ_r, μ_r แสดงส่วนจำนวนจริง และ ϵ_i, μ_i แสดงส่วนจำนวนเชิงซ้อน

โดยเครื่องหมายของเทอม n_r จะแสดงถึงทิศทางของ ความเร็วเฟส (Phase Velocity) ในขณะที่เครื่องหมายของ เทอมจำนวนจริงของ สัมประสิทธิ์ของพอยท์ทิงเวกเตอร์ (Poynting Vector) จะแสดงถึงทิศทางการไหลของ พลังงาน (Direction of Power Flow) [45] ดังแสดงในสมการที่ (2.7)

$$\operatorname{Re}\left(\frac{n}{\mu}\right) = n_r \mu_r + n_i \mu_i \quad (2.7)$$

นั่นคือในตัวกลางที่จะมีทิศทางของตรงกันข้ามระหว่าง ทิศทางการกลับทิศของ ความเร็วเฟสและทิศทางของการ เคลื่อนที่ของพลังงาน จะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$n_r < 0 \quad (2.8)$$

$$n_r \mu_r + n_i \mu_i > 0 \quad (2.9)$$

จากความสัมพันธ์ของสมการ (2.8) และ (1.9) R.A. Depine และ A. Lakhtakia ได้ทำการหาความสัมพันธ์ของทั้ง สองสมการออกมาได้ดังสมการที่ (2.10) [46]

$$\mu_i \varepsilon_r + \mu_r \varepsilon_i < 0 \quad (2.10)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.10) แล้วจะพบว่ากรณีที่ตัวกลางจะมีทิศทางของตรงกันข้ามระหว่างทิศทางของ ความเร็ว เฟสและทิศทางของการเคลื่อนที่ของพลังงานนั้นสามารถเกิดได้หลายกรณีด้วยกัน เช่น

- 1) ในกรณีที่ ε_r และ μ_r เป็นลบทั้งคู่จะเรียกในกรณีนี้ว่า Double Negative Index (DNG)
- 2) ในกรณีที่ ε_r เป็นลบจะเรียกในกรณีนี้ว่า Epsilon-Negative (ENG)
- 3) ในกรณีที่ μ_r เป็นลบจะเรียกในกรณีนี้ว่า Mu-Negative (MNG)

การที่แบ่งกรณีการเกิดดัชนีการหักเหของแสงติดลบได้เพียง 3 กรณีนั้นเนื่องจากว่าในอดีตกลุ่มนักวิจัย ต่างลงความเห็นกันว่าในส่วนของจำนวนเชิงซ้อนของ ε และ μ นั้นจะไม่สามารถติดลบได้ ทั้งนี้เนื่องจากกฎ การอนุรักษ์พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยหลักการของพอยท์ทิงเวกเตอร์ [47] ซึ่งต่อมาภายหลัง ก็มีการค้นพบว่าส่วนจำนวนเชิงซ้อนของ ε และ μ นั้นจะสามารถติดลบได้ [48-50] ดังนั้นการเกิดดัชนีการหัก เหนของแสงจึงไม่จำเป็นที่ส่วนจำนวนจริงของ ε_r และ μ_r จะต้องมียค่าติดลบเสมอไป

ในส่วนต่อไปจะเป็นการกล่าวถึงคุณสมบัติของ ε_r และ μ_r (Double Negative Index of Refraction, DNG) ที่เกิดจากส่วนจำนวนจริงของ μ และ ε ที่เป็นลบทั้งคู่ซึ่งเป็นกรณีแรกที่ Veselago กล่าวถึง

2.4 การเคลื่อนที่ของคลื่นในวัสดุที่มี ค่าความซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก และค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเป็นลบ ($\mu < 0$ และ $\varepsilon < 0$, Left-Handed)

จากความสัมพันธ์ของสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell Equation) และกฎการอนุรักษ์สามารถอธิบายได้จากสมการ (2.11) และ (2.12)

$$\begin{aligned} \text{curl} E &= -\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t} \\ \text{curl} H &= \frac{1}{c} \frac{\partial D}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} B &= \mu H \\ D &= \varepsilon E \end{aligned} \quad (2.12)$$

เมื่อ B คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก, H คือ สนามแม่เหล็ก, E คือ สนามไฟฟ้า, D คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า และ c คือ อัตราเร็วแสงในสุญญากาศ โดยในระนาบคลื่นที่มีความถี่เดียวกัน นั้นจะมีความสัมพันธ์อยู่ในรูปอัตราส่วนของ $e^{i(kz - \omega t)}$ เมื่อ ω คือความถี่เชิงมุม, และ k คือ ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น ซึ่งเราสามารถลดรูปสมการ (2.11) และ (2.12) ได้เป็น

$$\begin{aligned} k \times E &= \frac{\omega}{c} \mu H \\ k \times H &= -\frac{\omega}{c} \varepsilon E \end{aligned} \quad (2.13)$$

จากสมการที่ (2.13) ถ้า $\mu > 0$ และ $\varepsilon > 0$ แล้ว E, H และ k จะเป็นด้านมือขวา หรือ Right-Handed (วัสดุทั่วไปที่พบตามธรรมชาติ) และถ้า $\mu < 0$ และ $\varepsilon < 0$ จะเรียกว่าด้านมือซ้าย หรือ Left-Handed (วัสดุที่มีคุณสมบัติที่มี Permeability และ Permittivity น้อยกว่าศูนย์) และในเวลาเดียวกัน พอยท์ทิงเวกเตอร์ S (ทิศทางการไหลของพลังงาน) จะหาได้ดังสมการที่ (2.14)

$$S = E \times H \quad (2.14)$$

สมการที่ (2.14) นั้นหาได้จากการครอสเวกเตอร์ E และ H ทิศทางของเวกเตอร์คลื่น หรือ Wave Vector (k) นั้นจะมีทิศทางการเคลื่อนที่ไปในทิศเดียวกันกับกับความเร็วเฟส หรือ Phase Velocity (v_{ph}) ดังนั้น ถ้าวัสดุมีค่า Permeability และ Permittivity มีค่าเป็นลบ เวกเตอร์ v_{ph} และ Poynting's Vector S (ทิศทางการไหลของพลังงาน) จะมีทิศทางตรงกันข้าม ซึ่งเรียกกรณีนี้ว่าความเร็วเฟสติดลบ (Negative Phase Velocity) หรือ ความเร็ว

กลุ่มติลล (Negative Group Velocity) โดยปกติแล้วความเร็วกลุ่ม (v_g) จะมีความสัมพันธ์กับทิศทางของ พอยท์ ทิงเวกเตอร์ S หรือกล่าวคือความเร็วกลุ่มจะมีทิศเดียวกันกับการไหลของพลังงานจากตัวจ่ายไปยังตัวรับ ซึ่งจาก หลักการนี้เองจึงนำไปสู่การอธิบายในเรื่องของการกลับทิศ (Reverse) ของผลกระทบดอปเพลอร์ (Doppler Effect), ผลกระทบเชเรนคอฟ (Cerenkov Effect) และ กฎของสเนลล์ (Snell's Law) สมการที่ (2.15) และ (2.16) แสดงถึง Wave Vector และสมการของความเร็วเฟส

$$k^2 = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 n^2$$

$$k = \pm \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon\mu}$$
(2.15)

$$v_{ph} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$
(2.16)

โดยที่ n คือค่าดัชนีการหักเหของแสง ($n = \pm\sqrt{\epsilon\mu}$)

2.4.1 ผลกระทบดอปเพลอร์ (Doppler Effect)

ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ หรือ Doppler Effect นั้นกล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงความถี่และความยาวคลื่นของคลื่นที่ผู้รับ (Observer) ที่เคลื่อนที่สัมพันธ์กับแหล่งจ่ายคลื่น (Source) จะมีความสัมพันธ์กับตัวกลาง (Carrier) ที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านอีกด้วย พิจารณาสมการพื้นฐานของ ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ ในสมการที่ (2.17)

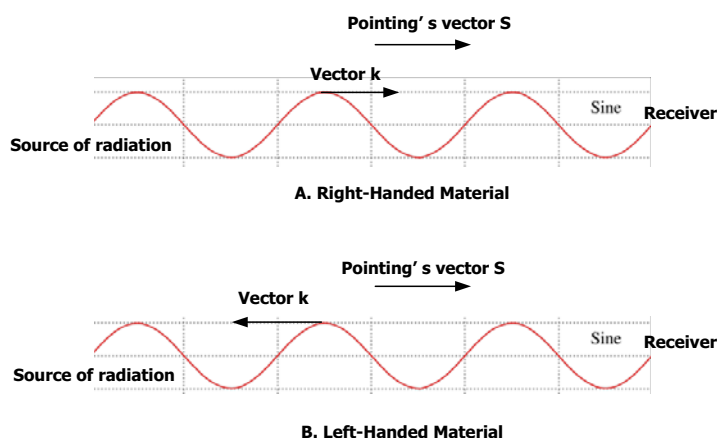
$$\omega = \omega_0 \left(1 - n \frac{v}{c}\right)$$
(2.17)

เมื่อ ω_0 คือความถี่ของตัวจ่าย (Source Frequency) v คือความเร็วของตัวรับ (Receiver Velocity) ซึ่งจะมีทิศทางเป็นบวกเมื่อเคลื่อนที่ออกจากแหล่งจ่าย c คือความเร็วของแสงซึ่งจะมีเครื่องหมายเป็นบวกเสมอ และ n คือค่าดัชนีการหักเหของแสง (Refractive Index) ของตัวกลางที่สนใจ

โดยทั่วไปแล้วในวัสดุที่มีพฤติกรรมเป็นด้านมือขวา (Right-Handed) ความถี่ที่ตัวรับจะรับได้ จะมีขนาดที่น้อยกว่าความถี่ของตัวส่ง (ω_0) ภาพที่ 2.8A. พิจารณาสมการที่ (2.17) สามารถอธิบายได้ว่าในตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเหของแสงติลล (n เป็นลบ) จะทำให้ขนาดความถี่ของตัวรับมากกว่าตัวจ่าย สังเกตได้จากเมื่อเครื่องหมายของ n เป็นลบจะทำให้สมการที่ (2.17) มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีผลทำให้เครื่องหมายของ Wave Vector k ที่เป็นลบ ตามสมการที่ (2.15) จะทำให้คลื่นไซน์ (Wave Vector k) เคลื่อนที่เข้าหาแหล่งจ่าย ส่วนคลื่น (Poynting's Vector S) เคลื่อนที่ออกไปจากแหล่งจ่าย ซึ่งเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกันตามภาพที่ 2.8B

ผลกระทบดอปเพลอร์ผกผัน หรือ Reversal Doppler Effect นั้นเราสามารถที่จะพบได้ในตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเหของแสงติลล จากคุณสมบัตินี้ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้นสามารถที่จะทำให้ ขบวนเสียง (Train-Whistle) ของเสียงในพิตช์ (Pitch) นั้นสูงขึ้นเมื่อมันเคลื่อนที่เข้ามาถึงและทำให้ระดับเสียงต่ำ ลงเมื่อ

พิชต์เคลื่อนที่ออกไป โดยเราสามารถที่จะนำหลักการนี้ไปประยุกต์ใช้ในการติดต่อสื่อสารผ่านโทรศัพท์มือถือซึ่งตอนนี้กำลังอยู่ในขั้นตอนของการทดลองและปรับปรุง



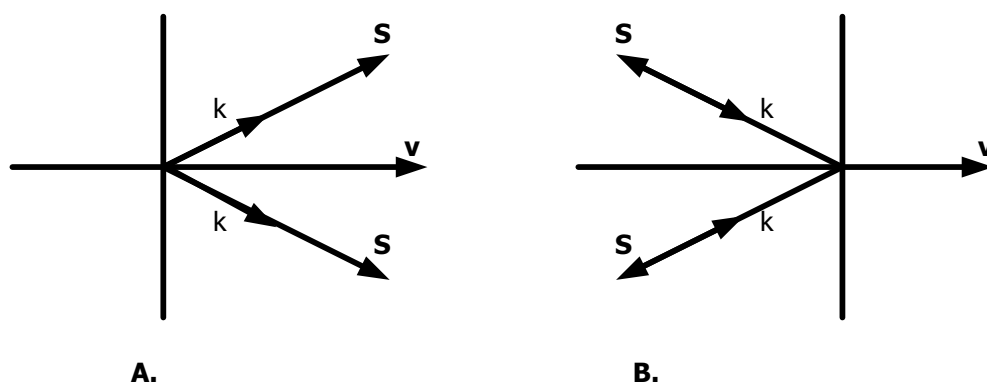
ภาพที่ 2.8 ทิศทางการเคลื่อนที่ของพลังงาน (Poynting's Vector, S) และทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น (Wave Vector, k) ในการเคลื่อนที่ในตัวกลางที่เป็นวัสดุเหนือธรรมชาติที่ประพุดิตัวเป็นวัสดุ Right-Handed และ Left-Handed

2.4.2 ผลกระทบเชเรนคอฟ (Cherenkov Effect)

ผลกระทบเชเรนคอฟ หรือ Cherenkov Effect เป็นผลกระทบหนึ่งที่เกิดจากการที่ค่า Permeability และ Permittivity เป็นลบทั้งคู่ ซึ่งจะกล่าวถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นไดอิเล็กทริก (Dielectric) ด้วยความเร็วที่เร็วกว่าความเร็วแสงที่เคลื่อนที่ในตัวกลางนั้น ซึ่งหากอนุภาคเคลื่อนที่ไปยังตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเหของแสง (Refractive Index) เป็นลบ ($n < 0$) ด้วยความเร็วที่เร็วกว่าความเร็วแสงที่เคลื่อนที่เร็วกว่าความเร็วแสงในตัวกลางนั้น อนุภาคเหล่านั้นจะไม่แผ่กระจายออก (Radiated) ไปข้างหน้าตามปกติแต่จะแผ่ออกไปในทิศทางกลับกัน ตาม ภาพที่ 2.3A. ซึ่งสามารถพิจารณาได้ตามจากสมการที่ (2.18) สมการของมุมของการกระจายของเชเรนคอฟ (Angle of Cherenkov Radiation)

$$\cos \theta = \frac{c}{vn} \quad (2.18)$$

เมื่อ c คือความเร็วแสง v คือความเร็วของอนุภาค n คือค่าดัชนีการหักเหของแสง (Refractive Index) ของตัวกลาง ถ้าค่าดัชนีการหักเหของแสงกลายเป็นลบ จะเห็นได้ว่ามุม θ จะอยู่ในจุดภาคที่ 2 ซึ่งจะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปยังทิศตรงข้ามกับทิศทางตามปกติดังภาพที่ 2.9B



ภาพที่ 2.9 ผลกระทบเชเรนคอฟ (A.)–ในตัวกลางที่ $n > 0$, (B.) ในตัวกลางที่ $n < 0$
เมื่อ V คือเวกเตอร์ของความเร็ว S คือทิศทางการเคลื่อนที่ของพลังงาน
(Poynting ' s Vector) และ k คือ ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น (Wave Vector)

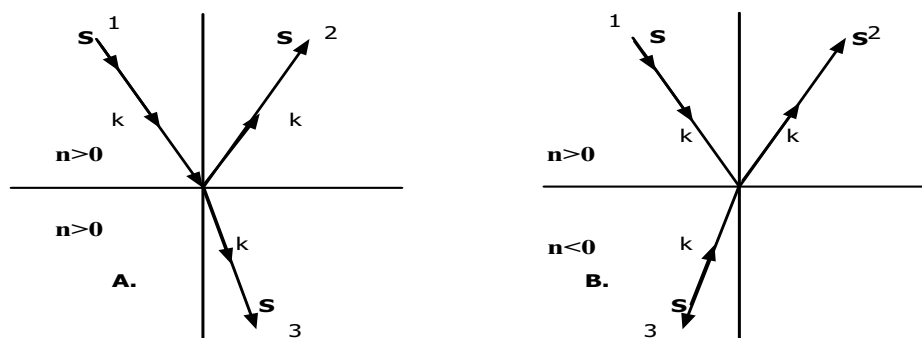
ในทางฟิสิกส์นั้น ผลจากผลกระทบเชเรนคอฟผกผัน (Reverse Cherenkov Effect) นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจจับเพื่อที่จะทำการระบุอนุภาคของประจุที่มีความเร็วแตกต่างกัน

2.4.3 กฎของสเนลล์ (Snell's Law)

สมการที่ (2.19) แสดงสมการของสเนลล์

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.19)$$

จากการที่ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น (Wave Vector, k) มีทิศทางตรงข้ามกับทิศของการเคลื่อนที่ของพลังงาน (Poynting ' s Vector S) จะเป็นเหตุให้เกิดการกลับทิศตามกฎของสเนลล์ (สมการที่ (2.19)) จากภาพที่ 2.10 พิจารณาการเคลื่อนที่ของคลื่นที่เคลื่อนตัวจากอากาศเข้าสู่ตัวกลางที่ค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบ ($n < 0$) จะสังเกตได้ว่าทิศทางการหักเหของคลื่นนั้นจะเบี่ยงเบนออกมาทางด้านเดียวกันกับด้านที่เคลื่อนที่เข้า



ภาพที่ 2.10 เส้นทางการสะท้อนของลำแสงที่รอยต่อของสุญญากาศ ($n > 0$) และตัวกลางที่มี

(A) ค่า $n > 0$ และ (B) $n < 0$, 1 คือ ลำแสงตกกระทบ (Incident Beams), 2 คือ ลำแสงสะท้อน (Reflected Beams), 3 คือ ลำแสงหักเห (Refracting Beams) S คือ ทิศทางการเคลื่อนที่ของพลังงาน และ k คือ ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น

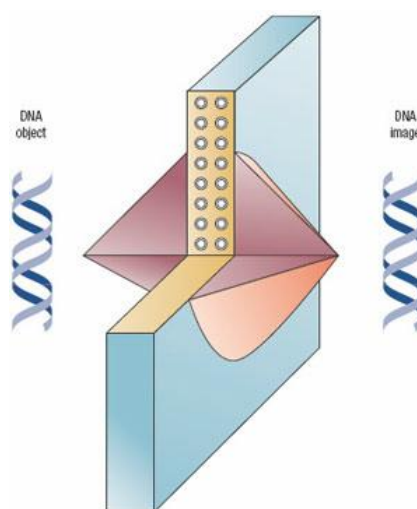
2.5 การประยุกต์ใช้วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์

คุณสมบัติอย่างแรกเลยที่มักจะนึกถึงเมื่อกล่าวถึงวัสดุเหนือธรรมชาติ คือคุณสมบัติของค่าดัชนีการหักเหของแสงติดลบ และสิ่งที่น่าสนใจต่อไปได้อีก ึ่งแรกที่จะสามารถนำเอาวัสดุเหนือธรรมชาติไปประยุกต์ใช้ด้วยก็คือ เลนส์สมบูรณ์ (Perfect lens) โดยการนำเสนอของ John Pendry ในปี ค.ศ. 2000 [4] จากคุณสมบัติเดียวกันนี้ยังสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับการชดเชยเฟส (Phase Compensation), การชดเชยการแพร่ (Dispersion Compensation) และอื่นๆ ยังได้มีการคิดค้น โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ ที่มีคุณสมบัติโครอลิติ และดัชนีการหักเหของแสงที่มีค่าติดลบไว้ในโครงสร้างเดียวกัน เพื่อใช้ในอุปกรณ์การตรวจสอบยา (Drug Discovery) เมื่อปี ค.ศ. 2006 โดยกลุ่มนักวิจัย A. Akyurtlu และคณะ จากมหาวิทยาลัยแมสซาชูเซตส์ (University of Massachusetts) ประเทศสหรัฐอเมริกา หรือ การใช้วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์เคลือบเพื่อสร้างวัตถุล่องหน (Invisible Objects) อย่างไรก็ตาม การศึกษาวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ยังคงอยู่ในระดับเริ่มต้น และยังมีช่องว่างให้ศึกษาและพัฒนา เพื่อประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น วัสดุเคลือบ (Coating Materials), เครื่องกรองสัญญาณ (Filters), ตัวเซ็นเซอร์ (Sensors), สายอากาศ (Antennas), เลนส์ (Lens) โยแก้วนำแสง (Fiber Optics) รวมถึงสร้างอุปกรณ์ใหม่ๆ ได้อีกด้วย

ตัวอย่างการนำเอาวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์มาประยุกต์ใช้

2.5.1 เลนส์สมบูรณ์ (Perfect Lens or Super Lens)

เลนส์ตามปกติที่ผลิตจากวัสดุที่มีในธรรมชาตินั้น ไม่สามารถที่จะทำการโฟกัสแสงลงไปยังวัตถุที่มีขนาดเล็กกว่าความยาวของคลื่นแสง ซึ่งทำให้ไม่สามารถที่จะมองเห็นถึงรายละเอียดของวัตถุนั้น เป็นเหตุที่ทำให้เกิดความไม่สมบูรณ์ของภาพ

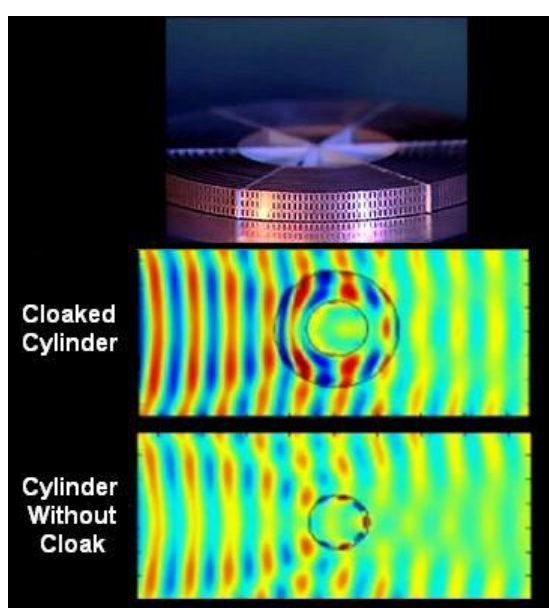


ภาพที่ 2.11 ความสามารถของเลนส์สมบูรณ์หรือ Perfect Lens ที่สามารถจับภาพที่ต้องการความละเอียดสูง (High-Resolution) โดยโคนสีแดงแสดงทางเดินของแสง

ความไม่สมบูรณ์ของภาพนี้เกิดขึ้นจากการที่เลนส์ไม่สามารถที่จะทำการจับรายละเอียดของภาพ (ที่มีขนาดเล็กกว่าความยาวของคลื่นแสง) โดยความละเอียดของภาพ (Finer Spatial Detail) ที่หายไปนี้จะถูกพาไปกับคลื่นเลื่อนหาย (Evanescent Wave) ซึ่งจะหายไประหว่างที่เคลื่อนที่จากวัตถุไปยังภาพ ในปี ค.ศ. 2000 John Pendry ได้เสนอว่าปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยวัสดุเหนือธรรมชาติโดยจะทำการรวบรวมเอาคลื่นเลื่อนหายที่เกิดขึ้นคืนกลับมา (Evanescent Wave Restoring) ที่ระนาบของการเกิดภาพ (Image Plane) [4] ซึ่งนี่เองจึงทำให้เลนส์สมบูรณ์มีความสามารถที่จะจับภาพที่มีความละเอียดสูงๆ ได้คมชัด ซึ่งในปี 2008 X. Zhang ได้แสดงตัวอย่างของการใช้ประโยชน์จากเลนส์สมบูรณ์ในการจับภาพที่มีความละเอียดสูงดังแสดงในภาพที่ 2.11 อย่างไรก็ตาม เลนส์สมบูรณ์ยังไม่สามารถสร้างขึ้นได้อย่างสมบูรณ์แบบ เนื่องจากว่ายังไม่มีโครงสร้างของเมตาเมททีเรียล โครงสร้างใดที่มีคุณสมบัติค่าดัชนีการหักเหของแสงที่ติดลบพร้อมกับคุณสมบัติไอโซทรอปิกใน 3 มิติที่สมบูรณ์แบบ

2.5.2 วัสดุล่องหน (Cloaking Object)

วัสดุล่องหน หรือ Invisible Object ทำจากวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ อุปกรณ์ดังกล่าวมีคุณสมบัติสามารถซ่อนวัตถุทรงกระบอกที่ทำจากทองแดงที่อยู่ภายในจากคลื่นไมโครเวฟ (ซึ่งเป็นแค่การทดลองเริ่มต้นในช่วงไมโครเวฟ (Microwave)) โดยใช้หลักการเบนรังสีไมโครเวฟที่เข้ามาด้านหนึ่งให้โค้งออกไปรอบๆ เมื่อผ่านไปอีกด้านหนึ่งแล้วลำแสงของรังสีก็เบนสู่ทิศทางเดิมเหมือนไม่มีอะไรผ่านเข้ามา เหมือนกับการที่น้ำไหลผ่านก้อนหินเรียบ ภาพที่ 2.12 แสดงผลการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบระหว่างวัตถุที่ห่อไว้ด้วยวัสดุล่องหนและไม่ได้ห่อด้วยวัสดุล่องหนโดยการทดสอบทำที่มหาวิทยาลัยดุก (Duke University) และมหาวิทยาลัยเพนซิลวาเนีย (University of Pennsylvania) ประเทศสหรัฐอเมริกา [5]

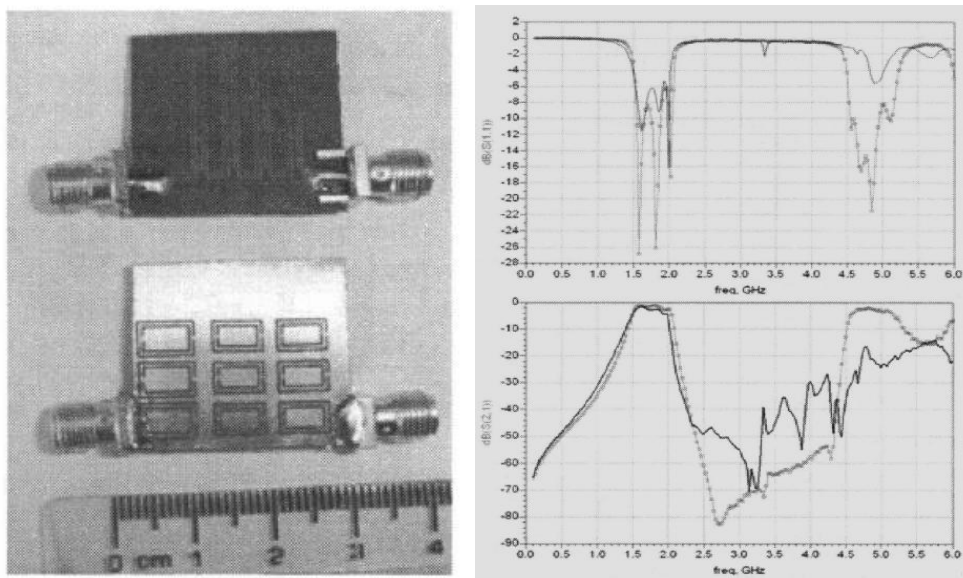


ภาพที่ 2.12 วัสดุล่องหนและผลการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบระหว่างวัตถุที่ห่อไว้ด้วยวัสดุล่องหนและไม่ได้ห่อด้วยวัสดุล่องหน

อย่างไรก็ตามการทำให้วัตถุหายไปได้จริงต่อสายตาคนยังคงอยู่ในระยะปรับปรุงและค้นคว้าเพิ่มเติมอีกมากซึ่งตอนนี้อุปกรณ์สามารถทำงานได้เฉพาะกับคลื่นไมโครเวฟและใน 2 มิติเท่านั้น

2.5.3 ตัวกรองสัญญาณ (Filter)

ตัวกรองแบบแถบช่วงความถี่ผ่าน (Bandpass Filter) ในช่วงคลื่นความถี่ไมโครเวฟ และ ความถี่สูงในช่วงแสง (Optical Filter) เป็นอุปกรณ์ส่วนหนึ่งที่สำคัญในอุปกรณ์ระบบอิเล็กทรอนิกส์ เช่น วิทยุ เซลลูลาร์ (Cellular Radio), การสื่อสารผ่านดาวเทียม (Satellite Communications), เรดาร์ (Radar) ปัจจุบันได้มีการ นำเอาวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์มาประยุกต์ใช้ในตัวกรองไมโครสตริป (Microstrip Coupled Line Filter) ซึ่ง จะทำให้เกิดแถบช่วงความถี่ผ่าน (Bandpass) ที่มีลักษณะที่ดี และสามารถกำจัดช่วงความถี่ที่ไม่ต้องการได้ดีขึ้น [51] ภาพที่ 2.13 แสดงตัวกรองไมโครสตริปและผลการทดลองเปรียบเทียบของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ระหว่างตัวกรองไมโครสตริป ที่มี องค์ประกอบของตัวสั่นพ้องแบบวงแหวน แยกส่วน (Complementary Split Ring Resonator, (CSRR)) และ ไม่มี CSRR

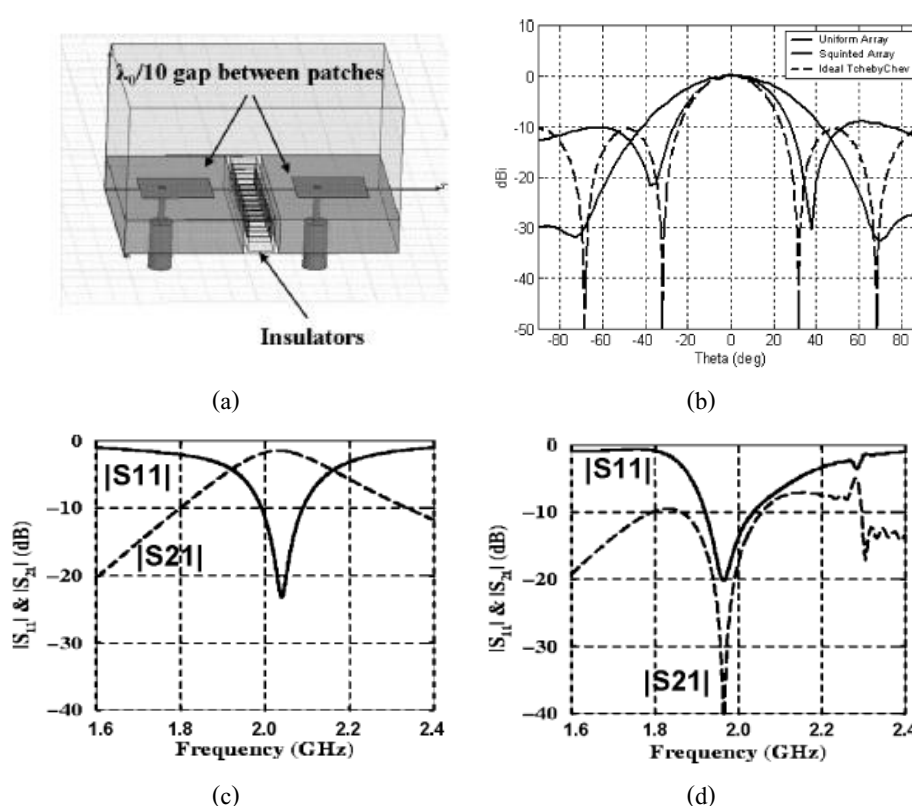


ภาพที่ 2.13 ตัวกรองไมโครสตริป และ ผลการทดลองเปรียบเทียบ S_{11} และ S_{21} ระหว่างตัวกรอง ไมโครสตริป ที่มี CSRR (เส้นสีดำ) และไม่มี CSRR (เส้นสีเทา) [51]

2.5.4 ฉนวนวัสดุเหนือธรรมชาติ (Metamaterial Insulator Enabled Superdirective Array)

ไม่เพียงแต่จะมีการนำเมตาเมททีเรียลมาประยุกต์ใช้ในการเพิ่มลักษณะของการส่งผ่านให้ สามารถส่งสัญญาณให้ได้อีกและมีความสูญเสียของสัญญาณน้อยๆ ดังที่ ได้แสดงในตัวอย่างที่แล้ว ก็ยังมีการ นำเอาเมตาเมททีเรียลมาใช้ในการเป็นฉนวนเพื่อให้ส่งสัญญาณได้น้อยๆ ในช่วงที่ไม่ต้องการ ดังจะเห็นได้จาก การ ออกแบบสายอากาศแบบแถวลำดับ (Array Antenna) นั้น สิ่งที่สำคัญในการออกแบบสายอากาศประเภทนี้ก็คือ จะต้องมีการเชื่อมร่วม หรือ Coupling ของสัญญาณระหว่างแถวลำดับ (Array Element) ให้น้อยที่สุด เนื่องจากการ เชื่อมร่วมนี้จะป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการลดทอนประสิทธิภาพของระบบ ทำให้ส่งสัญญาณออกไปได้ในทิศทาง ที่จำกัด และยังทำให้สามารถบรรจุสายอากาศในแถวลำดับได้น้อยลง

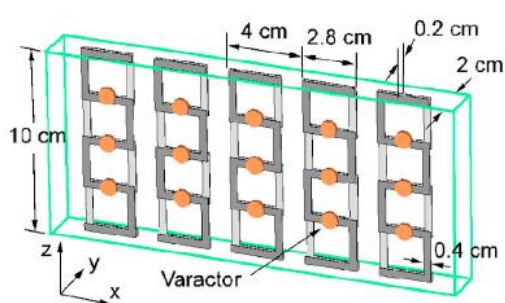
จากคุณสมบัติของเมตาเมททีเรียลที่สามารถออกแบบลักษณะองค์ประกอบของพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ ในปี 2007 กลุ่มวิจัยของ K. Bueh จึงได้ทำการนำเสนอการนำเอาเมตาเมททีเรียลมาประยุกต์ใช้กับสายอากาศแบบแถวลำดับเพื่อลดการเกิดเชื่อมร่วมระหว่างสายอากาศ โดยออกแบบให้ค่าในส่วนจินตภาพของ μ มีค่าติดลบมากๆ ทั้งนี้เนื่องจากว่าเทอมของจำนวนจินตภาพนั้นจะเป็นส่วนของการสูญเสียของสัญญาณ (Loss) แสดงในภาพที่ 2.14 จะสามารถสังเกตได้ว่าเมื่อมีการนำเอาเมตาเมททีเรียลมาวางระหว่างสายอากาศแบบแถวลำดับจะช่วยลดการเกิดการเชื่อมร่วมทำให้สามารถส่งผ่านสัญญาณออกไปได้น้อย และยังทำให้สามารถที่จะส่งสัญญาณออกไปได้หลายทิศทาง (Superdirective) ดังจะเห็นได้จากภาพที่ 2.14(b) ว่าค่าของสนามไฟฟ้าที่บริเวณ 61 องศา นั้นมีค่าสูงเมื่อเทียบกับตอนที่ไม่นำเมตาเมททีเรียลมาปรับปรุง [52]



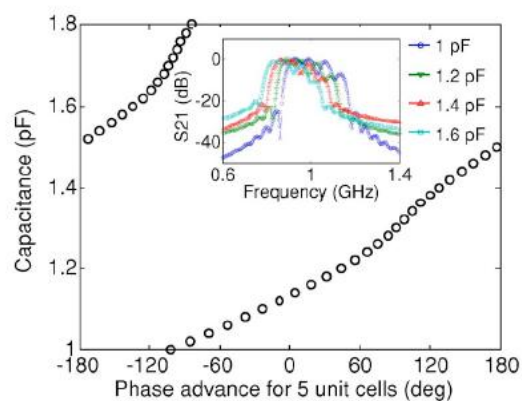
ภาพที่ 2.14 (a) แสดงการนำเอาวัสดุเหนือธรรมชาติมาประยุกต์ใช้กับสายอากาศแบบแถวลำดับ, (b) แสดงผลการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าของสายอากาศแบบแถวลำดับ, (c) แสดงลักษณะของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของสัญญาณเมื่อไม่ได้มีการวางเมตาเมททีเรียลไว้ระหว่างสายอากาศแบบแถวลำดับ และ d) แสดงลักษณะของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของสัญญาณเมื่อมีการวางเมตาเมททีเรียลไว้ระหว่างสายอากาศแบบแถวลำดับ [52]

2.5.5 การประยุกต์ใช้งานวัสดุเนื้อธรรมชาติในการควบคุมทิศทางของการส่งคลื่นสัญญาณ

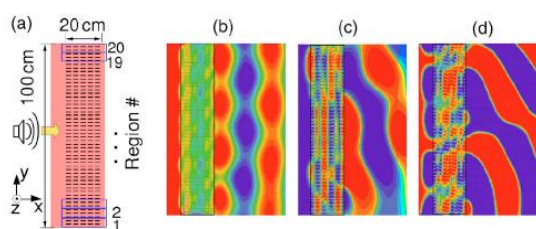
ในการควบคุมทิศทางของการส่งคลื่นสัญญาณไปในทิศทางตามที่ต้องการใช้งานนั้น จำเป็นที่จะต้องกำหนดให้มุมเฟสของหน่วยสายอากาศ (Antenna Element) นั้นมีค่าที่แตกต่างกัน ในปี 2006 กลุ่มวิจัยของ H. Chen ได้นำเสนอการนำเอาวัสดุเนื้อธรรมชาติมาใช้ในการควบคุมทิศทางของการส่งสัญญาณของโดมเรดาร์ (Radome) โดยได้ทำการนำเอาโครงสร้างรูปตัวเอส (S Shape) มาประยุกต์ใช้โดยติดตั้งตัวปรับ (Varactor) ไว้ที่โครงสร้างรูปตัว S เพื่อที่จะเป็นการควบคุมค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) ที่ใช้ในการปรับความกว้างของแถบผ่านของสัญญาณ และใช้ในการกำหนดเฟสของการส่งสัญญาณ ดังแสดงใน ภาพที่ 2.15 ซึ่งพบว่าเมื่อนำเอาโครงสร้างของวัสดุเนื้อธรรมชาติไปวางที่ผิวของโดมเรดาร์ แล้วทำการปรับตัวปรับให้ค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณต่างๆ ในค่าที่ต่างกันจะทำให้สามารถควบคุมทิศทางของการส่งสัญญาณได้ และยังพบว่าทำให้เกิดการสูญเสียของสัญญาณน้อยอีกด้วย [53]



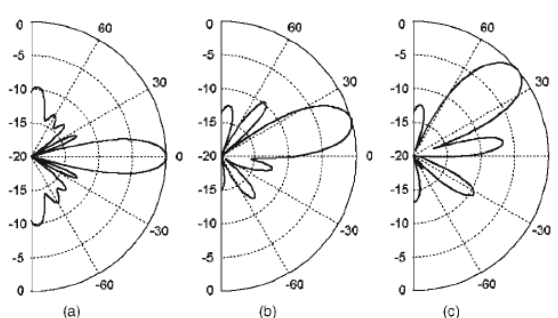
(a)



(b)



(c)



(d)

ภาพที่ 2.15 (a) แสดงการนำเอาโครงสร้างรูปตัว S มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมทิศทางของการส่งสัญญาณ, (b) แสดงขนาดของการส่งผ่านของสัญญาณและเฟสเมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าขนาดต่างๆ, (c) แสดงทิศทางของการส่งสัญญาณเมื่อมีการปรับค่าความจุไฟฟ้าที่ผิวของโดมเรดาร์ด้วยค่าที่แตกต่างกันตามบริเวณต่างๆ และ (d) แสดงแผนภาพการกระจายสัญญาณ (Radiation Pattern) เมื่อมีการปรับค่าความจุไฟฟ้าที่ผิวของโดมเรดาร์ด้วยค่าที่แตกต่างกัน [53]

ดังที่กล่าวมาแล้วว่าคุณสมบัติพิเศษทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ หรือ เมตาแมททีเรียลนั้นสามารถกำหนดได้โดยการออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสม แม้ว่าจะมีกลุ่มวิจัยหลายกลุ่มได้พยายามทำการพัฒนาวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ในขนาดนาโน โดยใช้หลักการของผลึกเชิงแสง (Photonic Crystals), สายส่ง (Transmission Lines), โครงสร้างโลหะ-ฉนวนไฟฟ้าขนาดนาโน (Metal-Dielectric Nanostructures) และอื่นๆ อย่างไรก็ตามยังไม่มีข้อสรุปว่าโครงสร้างใดดีที่สุด อีกทั้งวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ในโครงสร้างต่างๆ ก็มีข้อดีข้อเสียต่างกัน และเหมาะกับการประยุกต์ใช้ในงานที่ต่างกัน ดังนั้นการศึกษา วิเคราะห์ ทำความเข้าใจ หลักการทางกายภาพ (Physics) รวมถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้า (Electric and Electromagnetic Properties) ของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ เช่น โครดอลิติ, ไอโซทรอปิก, ไบไอโซทรอปิก, ค่าดัชนีการหักเหของแสงติดลบ จะทำให้เข้าใจพฤติกรรมและผลตอบสนองจากวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ที่เป็นศาสตร์และวิทยาการใหม่ได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งก็จะเป็นการช่วยการออกแบบโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์มีประสิทธิภาพมากขึ้นด้วย การพัฒนาและปรับปรุงโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ ให้มีคุณสมบัติเป็นตามเงื่อนไขและความต้องการของอุปกรณ์ไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้า จะสามารถช่วยพัฒนาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้า อาทิเช่น ความกว้างของสัญญาณ (Bandwidth) และการสูญเสีย ของสัญญาณ (Loss Factor) ของอุปกรณ์ดังกล่าวข้างต้นได้ ยิ่งไปกว่านั้นจากคุณสมบัติพิเศษเพิ่มเติมของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ขนาดนาโน จะช่วยให้สามารถสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่เคย ปรากฏว่าสร้างได้ให้เป็นจริงได้เช่น เลนส์สมบูรณ์ (Perfect Lens) และวัสดุล่องหน (Cloaking Object) ซึ่งโครงการวิจัยนี้มีความสนใจที่จะออกแบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ให้มีคุณสมบัติโครดอล ไอโซทรอปิก และ ดัชนีการหักเหของแสงติดลบไว้ในโครงสร้างเดียว เนื่องจากนับตั้งแต่วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ได้ถูกสร้างขึ้นจริง คณะวิจัยต่างๆ ได้พัฒนา ออกแบบและสร้างวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ ให้มีคุณสมบัติตามต้องการเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ เช่น วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ประเภท โครดอล ที่มี ดัชนีการหักเหของแสงติดลบ (Chiral Negative Refractive Index Metamaterials) [54-55], วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ประเภทไอโซทรอปิก ที่มีดัชนีการหักเหของแสงติดลบ (Isotropic Negative Refractive Index Metamaterials) [33, 56-58] และจากกลุ่มอื่นๆ ซึ่งพบว่าในแต่ละกลุ่มก็จะมีวิธีการแตกต่างกันออกไปซึ่งยุ่งยากและค่อนข้างซับซ้อน และยังไม่มียุคใดที่ได้ทำการออกแบบโครงสร้างที่มีคุณสมบัติโครดอล ไอโซทรอปิก และ ดัชนีการหักเหของแสงติดลบไว้ในโครงสร้างเดียวอย่างจริงจัง ดังนั้นภายในโครงการวิจัยนี้จะได้ทำการนำเสนอวิธีการออกแบบโครงสร้างของวัสดุเหนือธรรมชาติที่มีคุณสมบัติดังกล่าวให้ดียิ่งขึ้นโดยใช้วิธีทฤษฎีกลุ่มและได้นำวิธีการวัดความต่อเนื่องของลักษณะสมมาตร และ วิธีแบ่งครึ่งมุมสมมาตร (Angular Bisection Methods) มาช่วยในการคาดการณ์ค่าความแรงของคุณสมบัติโครดอลิตีของโครงสร้างที่ได้ทำการออกแบบในขั้นต้นอีกด้วยและใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าในการออกแบบค่าความจุไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้ากำหนดตำแหน่งของการเกิดช่วงแถบความถี่ผ่านของช่วงที่เกิดค่าดัชนีการหักเหของแสงติดลบดังจะได้แสดงวิธีการออกแบบในบทต่อไป

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 การจำแนกประเภทของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ (Classification of Artificial Electromagnetic Metamaterials)

เราสามารถจำแนกวัสดุ ออกเป็น 4 ประเภทใหญ่ๆตามองค์ประกอบทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงซ้อน (Complex Electromagnetic Materials) ได้แก่ ไอโซทรอปิก (Isotropic), ไบไอโซทรอปิก (Bi-Isotropic), แอนไอโซทรอปิก (Anisotropic), ไบแอนไอโซทรอปิก (Bi-Anisotropic) ซึ่งจะมียอดประกอบ (Parameters) ทางแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ 4 ตัวที่ใช้ในการอ้างอิงคือ โพลาริเซชันร่วม หรือ Co-Polarization สองตัวคือ Permeability (μ), Permittivity (ϵ) และโพลาริเซชันไขว้ หรือ Cross-Polarization (Magnetoelectricity) สองตัวคือ ξ (Xi) และ ζ (Zeta) และในแต่ละตัวยังมียอดประกอบย่อยอีก 9 ตัว รวมทั้งหมด 36 ตัว [34] ตารางที่ 3.1 แสดงการจำแนกประเภทของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงซ้อนทั้ง 4 ชนิด[59]

ตารางที่ 3.1 การจำแนกประเภทของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงซ้อน [59]

Isotropic ϵ, μ	Bi-Isotropic $\epsilon, \mu, \xi, \zeta$
Anisotropic ϵ, μ	Bi-Anisotropic $\epsilon, \mu, \xi, \zeta$

สมการที่ (3.1) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ $\epsilon, \mu, \xi, \zeta$ และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า [40]

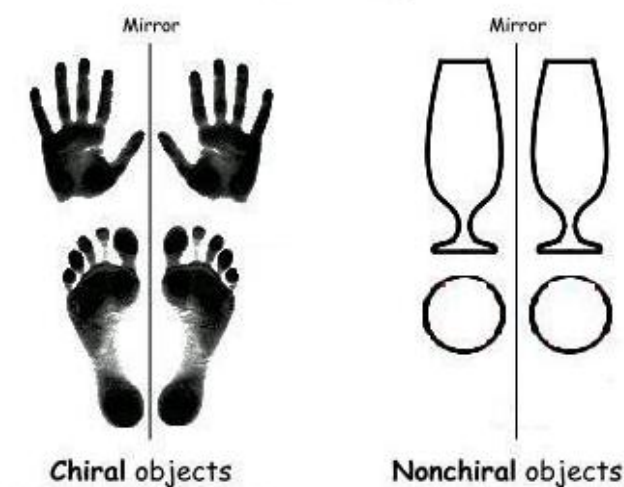
$$\begin{bmatrix} \overline{D} \\ \overline{B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{\epsilon} & \overline{\xi} \\ \overline{\zeta} & \overline{\mu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{E} \\ \overline{H} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

วัสดุที่อยู่ในกลุ่มไอโซทรอปิกนั้นถือได้ว่าเป็นกลุ่มที่พื้นฐานที่สุดเนื่องจากพารามิเตอร์ของ ϵ, μ ของวัสดุในกลุ่มนี้เป็นสเกลาร์ (Scalar) ทั้งหมด ในขณะที่ไบไอโซทรอปิกจะมีพารามิเตอร์หลัก 4 ตัวคือ $\epsilon, \mu, \xi, \zeta$ และทั้งหมดเป็นสเกลาร์ เช่นเดียวกับไอโซทรอปิก ดังนั้นวัสดุใน 2 กลุ่มนี้จึงไม่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ซึ่งจะมีประโยชน์ในการที่จะกำหนดให้คุณสมบัติของวัสดุเหมือนกันทั้งโครงสร้าง และในส่วนของไบไอโซทรอปิกยังมีเทอมของการเชื่อมร่วมระหว่างสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า (Magnetoelectric Coupling) อีกด้วย ส่วนในวัสดุที่อยู่ในกลุ่มของ แอนไอโซทรอปิกนั้นจะไม่มีเทอมของ โพลาริเซชันไขว้ เช่นเดียวกับไอโซทรอปิกแต่ว่า

พารามิเตอร์ในกลุ่มนี้จะเป็นเทนเซอร์ (ε, μ) ก็จะขึ้นอยู่กับทิศทางด้วย วัสดุในกลุ่มสุดท้ายคือ ไบแอนไอโซทรอปิกจะมีพารามิเตอร์หลักอยู่ 4 ตัวและเป็นเทนเซอร์ทั้งหมด $(\varepsilon, \mu, \xi, \zeta)$

3.2 ไครอลิตี (Chirality)

ไครอลิตี นั้นมีความหมายว่าวัตถุที่ไม่สามารถซ้อนทับกับภาพสะท้อนของตัวเองได้ นั่นก็คือมีคุณสมบัติของโพลาไรเซชันไขว้เพื่อความเข้าใจมากยิ่งขึ้นดูภาพที่ 3.1 ประกอบ ภาพทางด้านซ้ายมือแสดงวัตถุที่มีคุณสมบัติไครอลิตี ส่วนภาพทางด้านขวามือแสดงวัตถุที่ไม่มีคุณสมบัติไครอลิตี ซึ่งในการออกแบบทางแม่เหล็กไฟฟ้านั้นจะพยายามไม่ให้มี โพลาไรเซชันไขว้ (Cross-Polarization), รูปแบบของ Handedness (เป็นคุณสมบัติของโครงสร้างที่ใช้ในการบอกถึงความไม่สมมาตร), ความไวต่อการหมุนของ สภาวะโพลาไรเซชัน (Polarization State) และการกระเจิงของแสงในโครงสร้างไครอล แต่อย่างไรก็ตามข้อดีของไครอลนั้นก็มีเช่นกัน เมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์จำพวกอิเล็กทรอนิกส์แสง (Optoelectronic) [60] การเปลี่ยนแปลงของการ โพลาไรเซชัน ในวัตถุที่มีคุณสมบัติไครอลนั้นจะมี ความสัมพันธ์กับทิศทางของ ไครอลิตี ของวัตถุนั้นซึ่งจะพบได้จาก ความแตกต่างระหว่างวัตถุ Right และ Left-Handed ในการบ่งบอกถึงทิศทางของไครอลิตีของวัตถุนั้นจะแสดงถึงความสูญเสียลักษณะสมมาตร นั่นก็คือหากมีทิศทางแล้วจะมีลักษณะที่มีสมมาตรมาก



ภาพที่ 3.1 แสดงวัตถุ (a) ที่มีคุณสมบัติไครอลิตี และ (b) ไม่มีคุณสมบัติไครอลิตี

นอกจากค่าเทนเซอร์โพลาไรเซชันร่วมและโพลาไรเซชันไขว้ทั้ง 4 ที่ถูกเอามาใช้ในการจัดประเภทวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งซ้อนแล้ว การวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้แก่ ไครอลิตี, เรซิโปรคอล (Reciprocal) หรือลักษณะที่เป็นซึ่งกันและกัน และลักษณะสมมาตร (Symmetry) ของโครงสร้างจะช่วยให้จัดประเภทของวัสดุได้ย่อยลงไปอีก โดยวัสดุที่ไม่มีค่า ไครอลิตี จะเป็นวัสดุประเภทไอโซทรอปิกทั่วไป (Simple Isotropic) หรือ เทลlegen (Tellegen) ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าวัสดุนั้นมีคุณสมบัติเรซิโปรคอลหรือไม่ ในขณะที่วัสดุที่มีค่า

ไครออลิติจะเป็นวัสดุประเภทพาสเทอ (Pasteur) หรือ ไบไอโซทรอปิกทั่วไป (General Bi-isotropic) ตารางที่ 3.2 แสดงการจัดประเภทของวัสดุไบไอโซทรอปิกจากการมีค่าไครอลและเรซิโปรคอลของวัสดุ [40]

ตารางที่ 3.2 ประเภทของวัสดุไบไอโซทรอปิก [40]

	Achiral = ($\kappa = 0$)	Chiral = ($\kappa \neq 0$)
Reciprocal = ($\chi = 0$)	Simple Isotropic Medium	Pasteur Medium
Nonreciprocal = ($\chi \neq 0$)	Tellegen Medium	General Bi-Isotropic Medium

3.3 ประเภทของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์

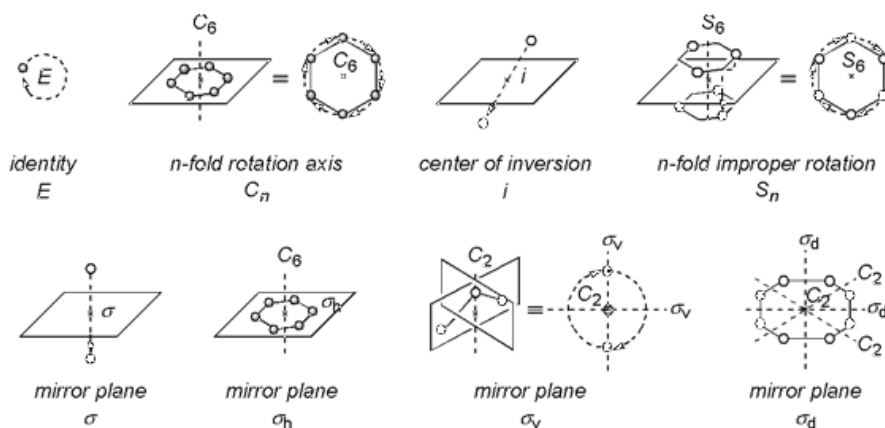
จากคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าและฟิสิกส์ของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ เราอาจแบ่งวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ออกเป็นประเภทต่างๆตามพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดังนี้

- 1) Negative Index Metamaterials (Double Negative Index of Refraction)
(Permittivity (ϵ) และ Permeability (μ) มีค่าน้อยกว่าศูนย์)
- 2) Single Negative Metamaterials
(Permittivity หรือ Permeability มีค่าน้อยกว่าศูนย์)
- 3) Chiral Meta-materials
(มี Cross Polarization Terms (ξ, ζ))

เมื่อ Permittivity คือ ค่าสภาพยอม ทางไฟฟ้า เป็นตัวบ่งว่าสนามไฟฟ้าและวัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric Medium) มีผลต่อกันและกันอย่างไร Permeability คือ ความซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก เป็นตัวชี้ผลตอบแทนของทางแม่เหล็กเมื่อมีการใส่สนามแม่เหล็กเข้ามาในวัสดุ และ Cross Polarization คือ โพลาริเซชันไขว้ ที่มีตัวประกอบของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าตั้งฉากกับตัวประกอบโพลาริเซชันที่ต้องการ

3.4 ทฤษฎีกลุ่ม (Group Theory)

ลักษณะของพันธะและคุณสมบัติทางกายภาพของโมเลกุลในทางเคมีนั้นเป็นเรื่องยากที่จะทำการศึกษาให้เข้าใจเนื่องจากมีความซับซ้อนอยู่มาก จึงได้มีการใช้ทฤษฎีกลุ่ม หรือ Group Theory เพื่อช่วยให้สะดวกและง่ายที่จะเข้าใจลักษณะของพันธะและคุณสมบัติทางกายภาพมากยิ่งขึ้น จากประโยชน์ของทฤษฎีกลุ่ม จึงได้มีผู้เห็นว่า ทฤษฎีกลุ่มน่าจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการจำแนกประเภทฟังก์ชันของโครงสร้างได้ จึงได้มีการนำเอาทฤษฎีกลุ่มมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 2005 [31-32] โดย W. J. Padilla และต่อมากลุ่มของ Wongkasem ก็ได้ปรับปรุงให้นำมาใช้งานได้ง่ายขึ้น [33, 61] โดยการแจกแจงคุณลักษณะและจัดกลุ่มประเภท (Identify and Classify) โดยทฤษฎีกลุ่มจะถูกนำมาเพื่อใช้ในการจัดประเภทของพารามิเตอร์ของวัสดุเหนือธรรมชาติ โดยอาศัยหลักการสมมาตรของกลุ่มจุด หรือ Point Group ความสมมาตรนั้นสามารถจำแนกคุณลักษณะเด่นตามโครงสร้างได้ออกเป็น 5 ประเภทคือ (1) เอกลักษณ์ (Identity) “E”, (2) การหมุนรอบ (Rotation หรือ Proper Rotation) “ C_n ”, (3) การสะท้อน Reflection “ σ ”, (4) การผกผัน (Inversion) “I”, (5) การหมุนและการสะท้อน (Rotation-Reflection หรือ Improper Rotation), “ S_n ” ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวนี้จะสามารถหาได้จาก (1) หาได้จากตัวมันเอง (2) เส้นตรง (Rotation Axis หรือ Proper Axis) (3) ระนาบ (Reflective Plane หรือ Mirror Plane) (4) พิจารณาจากจุดศูนย์กลางของสมมาตร หรือ จุดศูนย์กลางของการ Inversion (5) เส้นตรง (Alternating Axis หรือ Improper Axis) [34] ดังแสดงภาพที่ 3.2

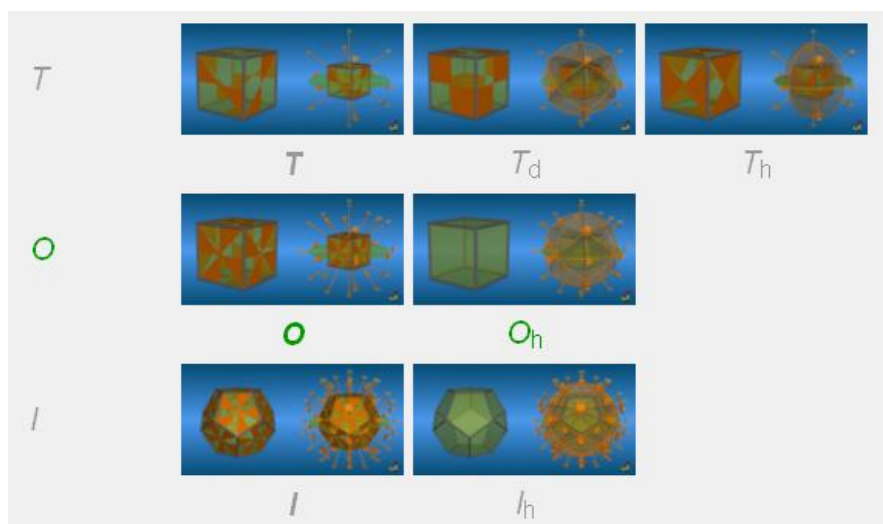


ภาพที่ 3.2 ตัวอย่างส่วนประกอบสมมาตร [63]

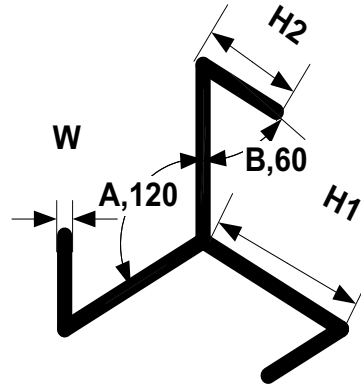
วิธีหนึ่งที่จะช่วยให้ง่ายแก่การจัดกลุ่มของโครงสร้างมากยิ่งขึ้นคือการพิจารณาลักษณะสมมาตรที่กล่าวมาข้างต้นทีละขั้นตอนตามแผนภาพในภาพที่ 3.3 ดังนั้นจึงเป็นวิธีการที่จะช่วยให้เราสามารถพิจารณาค่าพารามิเตอร์ของวัสดุที่มีความซับซ้อนให้้ง่ายมากยิ่งขึ้น [14]

3.5 ออกแบบโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีกลุ่ม

คุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้า ความสมมาตรของโครงสร้าง และการเชื่อมร่วมระหว่าง สนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้า (Magnetoelectric Coupling) นั้นเป็นคุณสมบัติหลักที่เราต้องการให้มีในโครงสร้างที่จะออกแบบ ดังนั้นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่จำเป็นจะต้องมีคือ 2 เทอมของโพลาริเซชันร่วม คือ Permeability (μ), Permittivity (ϵ) และ 2 เทอมของโพลาริเซชันไขว้ (Magnetoelectricity) คือ ξ (Xi) และ ζ (Zeta) จากเงื่อนไขดังกล่าว พบว่าโครงสร้างใน 2 แถวสุดท้ายของตารางที่ 3.3 นั้นมีคุณสมบัติของไบโอโซโทรปิกแต่เนื่องจากว่าโครงสร้างในกลุ่ม T, O และ I มีลักษณะเป็นโครงสร้างที่ยากแก่การนำมาสร้างบนระนาบ 2 มิติ ดังแสดงในภาพที่ 3.4 ซึ่ง Immel ได้นำเสนอไว้ในปี 2008 ดังนั้นเราจึงได้หันมาพิจารณาโครงสร้างในกลุ่มของ ไบแอนไอโซโทรปิกแทน ซึ่งหากเรานำเทคนิคของ โพลาริเซชันของคลื่น (Wave Polarization) มาพิจารณาโดยทำการจัดใส่สนามไฟฟ้า ภายนอกเพื่อสร้างกระแสและตรวจสอบทิศทาง จะทำให้ โครงสร้างนั้นไม่ได้อยู่ในกลุ่มของวัสดุเชิงซ้อนดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.3 แต่โครงสร้างดังกล่าวจะยังคงอยู่ในเซตย่อย (Subset) ภายใต้กลุ่มที่ได้เสนอไว้ ซึ่งสามารถแสดงแผนภาพ เซตย่อย ของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงซ้อนได้ดัง ภาพที่ 3.5 [63] เมื่อพิจารณาโครงสร้าง ในกลุ่มของไบแอนไอโซโทรปิกประกอบกับการพิจารณาด้วยเทคนิคโพลาริเซชันของคลื่น แล้วจึงทำให้เราเลือกที่จะศึกษาโครงสร้างในกลุ่ม C_n ดังแสดงในภาพที่ 3.6 เนื่องจากว่าเป็นโครงสร้างที่ง่ายแก่การ นำมาสร้างในระนาบ และยังคงมีคุณสมบัติไบโอโซโทรปิกในระนาบอีกด้วยซึ่งจะได้แสดงในส่วนต่อไป



ภาพที่ 3.4 โครงสร้างของกลุ่มไบโอโซโทรปิกซึ่งประกอบด้วยกลุ่ม T, O และ I



ภาพที่ 3.7 โครงสร้างของ C_3

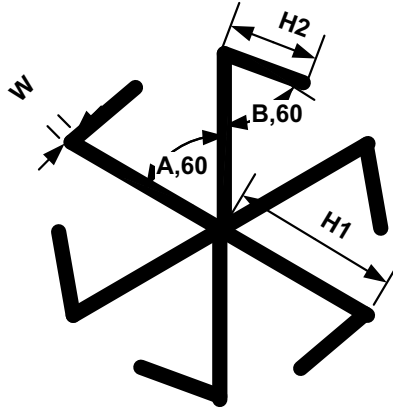
ใช้หลักการทฤษฎีกลุ่มทำการจัดกลุ่มลักษณะสมมาตรของโครงสร้าง เพื่อหารูปแบบแสดงที่ไม่สามารถลดรูปได้อีก (Irreducible Representations) ของโครงสร้าง C_3 ในภาพที่ 3.3 สามารถจัดกลุ่มได้ดังสมการที่ (3.2)

$$\Gamma = 2A + 2\{E\} \quad (3.2)$$

เมื่อ A แสดงการโพลาไรซ์ของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน z และยังแสดงการโพลาไรซ์ของสนามแม่เหล็กตามแนวแกน z เนื่องมาจากการฟังก์ชันการหมุน (Rotation Function), E แสดงการโพลาไรซ์ของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x และ y และยังแสดงการโพลาไรซ์ของสนามแม่เหล็กตามแนวแกน x และ y เนื่องมาจากการฟังก์ชันการหมุน (Rotation Function) โดยองค์ประกอบทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุของโครงสร้าง C_3 ที่หาได้จากสมการที่ (3.2) นั้นได้แสดงในสมการที่ (3.3)

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & 0 \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{bmatrix}, \mu = \begin{bmatrix} \mu_{xx} & \mu_{xy} & 0 \\ \mu_{yx} & \mu_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{zz} \end{bmatrix}, \xi = \begin{bmatrix} \xi_{xx} & \xi_{xy} & 0 \\ \xi_{yx} & \xi_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{zz} \end{bmatrix}, \zeta = \begin{bmatrix} \zeta_{xx} & \zeta_{xy} & 0 \\ \zeta_{yx} & \zeta_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \zeta_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

โดยที่ค่าพารามิเตอร์ในแกน xx, xy, yx และ yy นั่นคือ $\epsilon_{xx} = \epsilon_{xy} = \epsilon_{yx} = \epsilon_{yy}$, $\mu_{xx} = \mu_{xy} = \mu_{yx} = \mu_{yy}$, $\xi_{xx} = \xi_{xy} = \xi_{yx} = \xi_{yy}$ และ $\zeta_{xx} = \zeta_{xy} = \zeta_{yx} = \zeta_{yy}$ ซึ่งมีค่าเท่ากันหมด (Identical) จึงทำให้สามารถพิจารณาได้ว่าโครงสร้าง C_3 นั้นมีคุณสมบัติไอโซทรอปิกในระนาบ xy



ภาพที่ 3.8 โครงสร้างของ C_6

เช่นเดียวกันกับโครงสร้าง C_6 (ภาพที่ 3.8) สามารถหาแบบแสดงที่ไม่สามารถลดรูปได้อีก ได้ออกมาเป็นดังในสมการที่ (3.4) และหาค่าประกอบทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุได้ดังสมการที่ (3.5) โดยที่ค่าพารามิเตอร์ในแกน xx , xy , yx และ yy นั้นมีค่าเท่ากันหมด (Identical) จึงทำให้สามารถพิจารณาได้ว่าโครงสร้าง C_6 นั้นมีคุณสมบัติไอโซทรอปิกในระนาบ xy

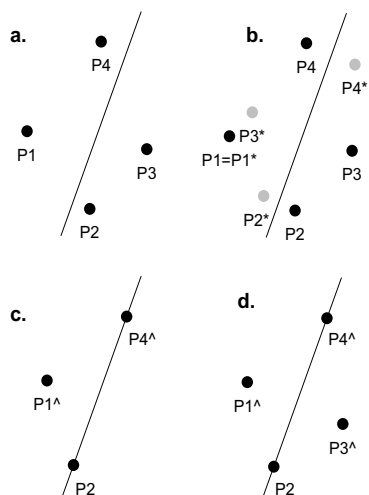
$$\Gamma = 2A + 2B + 2\{E_1\} + 2\{E_2\} \quad (3.4)$$

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & 0 \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{bmatrix}, \mu = \begin{bmatrix} \mu_{xx} & \mu_{xy} & 0 \\ \mu_{yx} & \mu_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{zz} \end{bmatrix}, \zeta = \begin{bmatrix} \zeta_{xx} & \zeta_{xy} & 0 \\ \zeta_{yx} & \zeta_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \zeta_{zz} \end{bmatrix}, \zeta = \begin{bmatrix} \zeta_{xx} & \zeta_{xy} & 0 \\ \zeta_{yx} & \zeta_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \zeta_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

พิจารณาองค์ประกอบทางแม่เหล็กไฟฟ้าของทั้ง C_3 และ C_6 จะพบว่ามีองค์ประกอบทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหมือนกัน แต่อย่างไรก็ตามค่าขององค์ประกอบทางแม่เหล็กไฟฟ้านั้นอาจจะไม่เท่ากันก็ได้ แม้ว่าองค์ประกอบทางแม่เหล็กไฟฟ้าของทั้งสองโครงสร้างจะไม่ได้เป็นสเกลาร์ทั้งหมดทุกแกนก็ตาม แต่เมื่อพิจารณาในระนาบของโครงสร้างแล้ว (xy -plane) จะพบว่าค่าองค์ประกอบทางแม่เหล็กไฟฟ้าในแกน xx , xy , yx และ yy ($\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \epsilon_{xy} = \epsilon_{yx}$, $\mu_{xx} = \mu_{yy} = \mu_{xy} = \mu_{yx}$, $\zeta_{xx} = \zeta_{xy} = \zeta_{yx} = \zeta_{yy}$, และ $\zeta_{xx} = \zeta_{xy} = \zeta_{yx} = \zeta_{yy}$) นั้นมีค่าเท่ากันหมด จึงทำให้สามารถพิจารณาได้ว่าโครงสร้างทั้งสองนั้นมีคุณสมบัติไอโซทรอปิกในระนาบ xy ซึ่งเป็นคุณสมบัติของไอโซทรอปิกและมีพารามิเตอร์ $\epsilon, \mu, \zeta, \zeta$ ซึ่งมีเทอมของโพลาไรเซชันไขว้ตามที่เรากำลังต้องการ ดังนั้นโครงสร้าง C_3 และ C_6 จึงมีคุณสมบัติของไครอล และไอโซทรอปิก

3.6 ทำการตรวจสอบคุณสมบัติไครอลด้วยวิธีการวัดความต่อเนื่องของลักษณะสมมาตร

Continuous Chirality Measures (CCM) หรือ วิธีการวัดความต่อเนื่องของลักษณะสมมาตร เป็นวิธีที่ใช้ในการคำนวณค่าดัชนีไครอลลิตี หรือ Chirality Index ของโครงสร้างของโมเลกุล [17] ซึ่งใช้หลักการพื้นฐานที่ว่าไครอลลิตีนั้นจะแสดงถึงความสูญเสียลักษณะสมมาตรของโครงสร้าง



ภาพที่ 3.7 วิธีหาค่าดัชนีไครอลลิตีด้วยวิธีการวัดความต่อเนื่องของลักษณะสมมาตร

วิธีการคำนวณหาค่าดัชนีไครอลลิตี

- 1) ทำระยะห่างของพิกัดจุดให้เป็นมาตรฐาน (Normalize)
- 2) เลือกระนาบการหักเห (Refraction) (ภาพที่ 3.7a.)
- 3) เลือกจับคู่ของพิกัดจุดตามความสมมาตร เช่น P1 และ P3
- 4) หาระยะทางของจุดไปยังเส้นแกนสะท้อน (Mirror Axis) จากสูตร

$$d = \frac{|Ax + By + c|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (3.6)$$

- 5) เชื่อมจุด P1 กับจุด P3 ที่เราย้ายข้างไปอีกด้านของแกนกระจก หรือ Mirror Axis (ภาพที่ 3.7b.) จะได้ $\hat{P}_1$ (ภาพที่ 3.7c.)
- 6) ย้ายข้าง $\hat{P}_1$ มาอีกด้านของ Mirror Axis จะได้ $\hat{P}_3$ (ภาพที่ 3.7d.)
- 7) ในกรณีที่ เป็นจุดใดๆ เช่น P2, P4 ให้คิดจุดใหม่เป็นจุดตัดของสมการเส้นตรงที่ลากผ่านจุดนั้นและตั้งฉากกับ Mirror Axis (ภาพที่ 3.7d.)

สามารถหาค่าดัชนีไครอลลิตีได้จากสมการที่ (3.7)

$$S'(G) = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} \|P_i - \hat{P}_i\|^2 \quad (3.7)$$

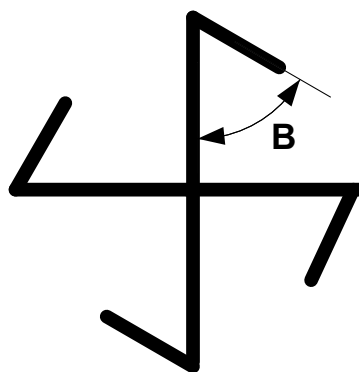
เมื่อ n_p คือ จำนวนจุด

P_i คือ พิกัดจุดเดิม

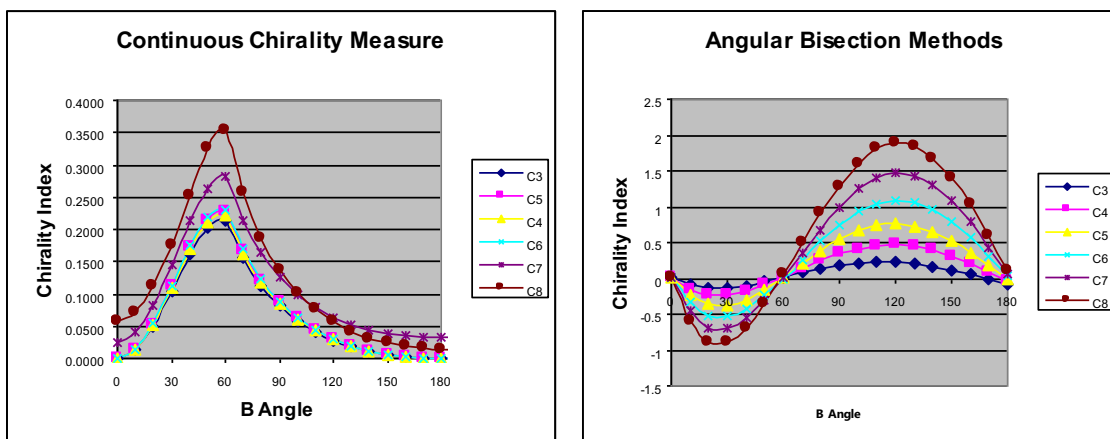
$\hat{P}$ คือ พิกัดจุดใหม่หลังทำการย้ายพิกัดจุดใหม่

3.7 เปรียบเทียบค่าดัชนีไครอลลิตีของโครงสร้าง C_3 - C_8

ค่าดัชนีไครอลลิตี (Chirality Index) ของโครงสร้างที่ได้ทำการออกแบบ (C_3 - C_8) ถูกคำนวณหาด้วยวิธีการวัดความต่อเนื่องของลักษณะสมมาตร (Continuous Chirality Measures, CCM) เพื่อหาโครงสร้างที่สามารถให้ค่าดัชนีไครอลลิตีสูงที่สุด โดยการทำการเปลี่ยนแปลงค่ามุม B (ภาพที่ 3.8) ทุกโครงสร้างได้ทำการทดลองเปลี่ยนค่ามุม B จาก 0 ถึง 360 องศา ในขณะที่ความยาวของ แขนหลักและแขนย่อย ถูกจำกัดให้คงที่ไว้ ภาพที่ 3.9 แสดงการเปรียบเทียบค่าดัชนีไครอลลิตีของโครงสร้าง C_3 - C_8 เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่ามุม B



ภาพที่ 3.8 การเปลี่ยนแปลงมุม B ของโครงสร้างของ C_4

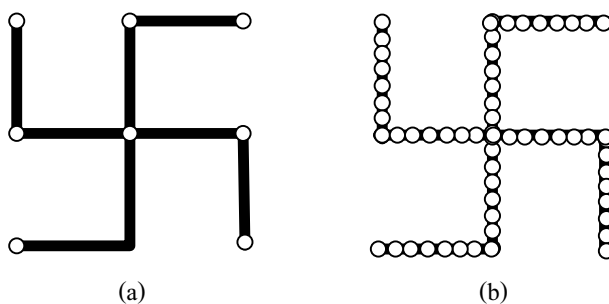


(a)

(b)

ภาพที่ 3.9 การเปรียบเทียบค่าดัชนีไครอลิตีของโครงสร้าง C_3 - C_8 (a) วิธีการวัดความต่อเนื่องของลักษณะสมมาตร (Continuous Chirality Measures) และ (b) วิธีแบ่งครึ่งมุมสมมาตร (Angular Bisection Methods)

เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์จึงได้ทำการเปรียบเทียบกับวิธีแบ่งครึ่งมุมสมมาตร [18] ของ Pott (ภาพที่ 3.9(b)) ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณค่าไครอลิตีด้วยวิธี CCM นั้น (ภาพที่ 3.9(a)) แม้จะให้ผลไม่เหมือนกับวิธีคำนวณแบ่งครึ่งมุมสมมาตรแต่ก็ให้ผลที่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันดังที่ได้แสดงไว้ใน [64] การที่ผลลัพธ์ที่ได้จากสองวิธีนี้มีความแตกต่างกันทั้งนี้เนื่องจากว่าทั้งสองวิธีนี้มีหลักการในการคำนวณค่าไครอลิตีที่ต่างกัน กล่าวคือ วิธีวิธีแบ่งครึ่งมุมสมมาตรนั้นจะคำนวณค่าไครอลิตีจากผลรวมของค่าดัชนีไครอลิตีที่เกิดจากการจับกลุ่มของสามจุดใดๆ ในโครงสร้าง ส่วนวิธี CCM นั้นจะใช้หลักการในการหาระยะทางที่สั้นที่สุดของจุดสำคัญของโครงสร้างไปยังตำแหน่งที่ทำให้โครงสร้างมีความสมมาตร โดยจะต้องเลือกแกนสะท้อน (Mirror Axis) ให้เหมาะสม [65] ภาพที่ 3.10 แสดงการกำหนดจุดที่ใช้ในการคำนวณค่าไครอลิตีของทั้งสองวิธี



(a)

(b)

ภาพที่ 3.10 แสดงการกำหนดจุดที่ใช้ในการคำนวณค่าไครอลิตีด้วยวิธี

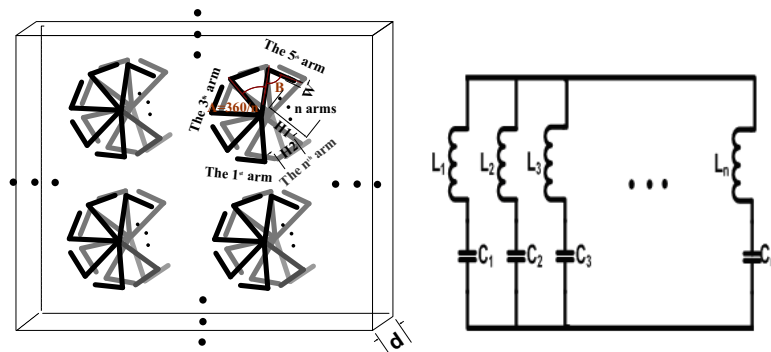
- (a) วิธีการวัดความต่อเนื่องของลักษณะสมมาตร (Continuous Chirality Measures) และ
(b) วิธีแบ่งครึ่งมุมสมมาตร (Angular Bisection Methods)

จากภาพที่ 3.9(a) ค่าดัชนีโครอลลิที่คำนวณด้วยวิธี CCM ของทุกโครงสร้าง (C_3 - C_8) นั้นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยจะได้ค่าสูงสุดที่มุม B เท่ากับ 60 องศา ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่าดัชนีโครอลลิที่โครงสร้าง C_8 นั้นจะให้ค่าสูงสุดที่มุม B มีค่าเท่ากับ 60 องศาเท่ากับ 0.352959 ซึ่งมากกว่าเกือบถึง 2 เท่าของโครงสร้างที่มีคุณสมบัติโครอลลิที่เป็นที่รู้จักกันดี, แกมมาเดียน (Gammadion) [60, 64] ซึ่งสามารถอธิบายได้จากระยะทางสมมาตร (Symmetry Distance, SD) ของโครงสร้าง [66] และจากหลักการคำนวณหาค่าดัชนีโครอลลิที่ของ Zabrodsky ที่นำเฉพาะจุดที่สำคัญของโครงสร้างมาคำนวณ ดังนั้นเมื่อโครงสร้างถูกนำมาประกบกันก็ยังคงจะรักษาคุณสมบัติของโครอลลิที่ไว้ได้อยู่ ทั้งนี้เนื่องจากว่าตำแหน่งที่นำมาคำนวณหาค่าดัชนีโครอลลิที่หลังจากที่นำโครงสร้าง 2 ตัวมาประกบกันยังอยู่ตำแหน่งเดิม ดังแสดงในภาพที่ 3.11 ซึ่งจะเป็นผลดีต่อโครงสร้างของเราเนื่องจากว่ายังรักษาคุณสมบัติไว้ได้เหมือนเดิมแม้จะนำมาประกบกัน

3.8 การออกแบบดัชนีการหักเหของแสงติลด์โดยใช้หลักการวิเคราะห์วงจร

โครงสร้างของตัวสั้นพ้องแบบวงแหวนแยกส่วน หรือ Split Ring Resonator (SRR) นั้นไม่เพียงสามารถที่จะให้ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (ϵ) เป็นลบได้แล้วยังสามารถที่จะทำให้เกิดค่า ซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก (μ) เป็นลบได้แต่จะทำให้เกิดความถี่สูงๆ ซึ่งสูงกว่าค่าของ μ มากประมาณ 2-3 เท่า [15] ดังนั้นถ้าหากเราสามารถเลื่อนตำแหน่งของการเกิด ϵ ที่เป็นลบให้ลดต่ำลงมาและปรับค่า μ ที่เป็นลบให้เกิดที่ความถี่สูงขึ้นให้เกิดขึ้นในเวลาเดียวกันก็จะทำให้สามารถทำให้เกิดแถบความถี่ผ่าน (Pass Band) ของดัชนีการหักเหของแสงติลด์ (Negative Refractive Index, NRI) ดังนั้นในการออกแบบโครงสร้างของเราจึงได้พยายามทำการออกแบบโครงสร้างให้ค่า μ เป็นลบที่ความถี่ที่สูงขึ้นจากเดิม และทำให้ค่า ϵ เป็นลบในช่วงที่ความถี่ต่ำลง เพื่อให้ค่า μ และ ϵ เกิดขึ้นเป็นลบในช่วงความถี่เดียวกัน

จากโครงสร้างที่ได้เราได้ทำการออกแบบและหาองค์ประกอบทางแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้างด้วยหลักการทฤษฎีกลุ่ม ในขั้นตอนต่อไปเราจะทำการออกแบบในส่วนของ ดัชนีการหักเหของแสงที่ติลด์ของโครงสร้างโดยใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์วงจร (Circuit Analysis) ซึ่งสามารถแปลงโครงสร้างที่ออกแบบ (ซ้อนกัน 2 ชั้นในลักษณะที่ตรงข้ามกัน) ออกมาในรูปวงจรไฟฟ้าได้ดังภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 โครงสร้างของ C_n ที่ออกแบบและวงจรรวมของโครงสร้างที่หาจากทฤษฎีการวิเคราะห์วงจรเมื่อ W คือความกว้างของแขน และ H1 คือแกน H2 คือแขนของแกน d คือระยะห่างระหว่าง 2 แผ่น

เราสามารถคำนวณหาค่าความถี่แม่เหล็กสั่นพ้อง (Magnetic Resonant Frequency) ของโครงสร้างที่ได้ทำการออกแบบ (ω_{m0}) จากค่าตัวเก็บประจุรวม (Total Capacitance) และ ค่าตัวเหนี่ยวนำรวม (Total Inductance) ได้ ดังสมการที่ (3.8)

$$\omega_{m0} = \sqrt{\frac{1}{L_T C_T}} \quad (3.8)$$

ค่าของตัวเหนี่ยวนำในแต่ละรูปของวงจรสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.9)

$$L = \left(1 + \frac{H_2}{H_2 + 2H_1}\right)^2 \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\begin{aligned} &2H_1 \ln(H_1/W) + H_2 \ln(H_1/W) - \\ &2(H_1 + H_2) \sinh^{-1}(H_2^2 / \sqrt{(2H_1 H_2)^2 - H_2^4}) \\ &- 2H_1 \sinh^{-1}(2H_1^2 - H_2^2 / \sqrt{(2H_1 H_2)^2 - H_2^4}) \\ &-(2H_1 + H_2) \end{aligned} \right] \quad (3.9)$$

ในงานวิจัยนี้เราพิจารณาเพียงแค่แรงระหว่างลูปปิดที่เกิดจากการประกบ 2 โครงสร้างเข้าด้วยกัน ตามสมการการคำนวณหาความเหนี่ยวนำไฟฟ้าใน [67-69] ไม่ได้คำนวณลึกลงไปถึงแรงของแอมแปร์ (Ampere's Force) หรือแรงของกราสแมน (Grassmann's Force) [70]

ในส่วนของการคำนวณค่าตัวเก็บประจุนั้นสามารถคำนวณได้โดยพิจารณาส่วนที่เกิดการซ้อนทับในลักษณะที่ขนานกันของแขนของโครงสร้าง [30, 71] ดังสมการที่ (3.10)

$$C = \frac{\epsilon_0 w H_2}{d} - \frac{\epsilon_0 w H_2}{l - d} \quad (3.10)$$

โดยที่ $l = 2H_1 + H_2$

ค่าตัวเก็บประจุรวมและค่าตัวเหนี่ยวนำรวมสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.11) และ (3.12) ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อนำไปแทนค่าในสมการที่ (3.8) จะทำให้เราสามารถคาดการณ์ช่วงการเกิดความถี่แม่เหล็กสั่นพ้องได้

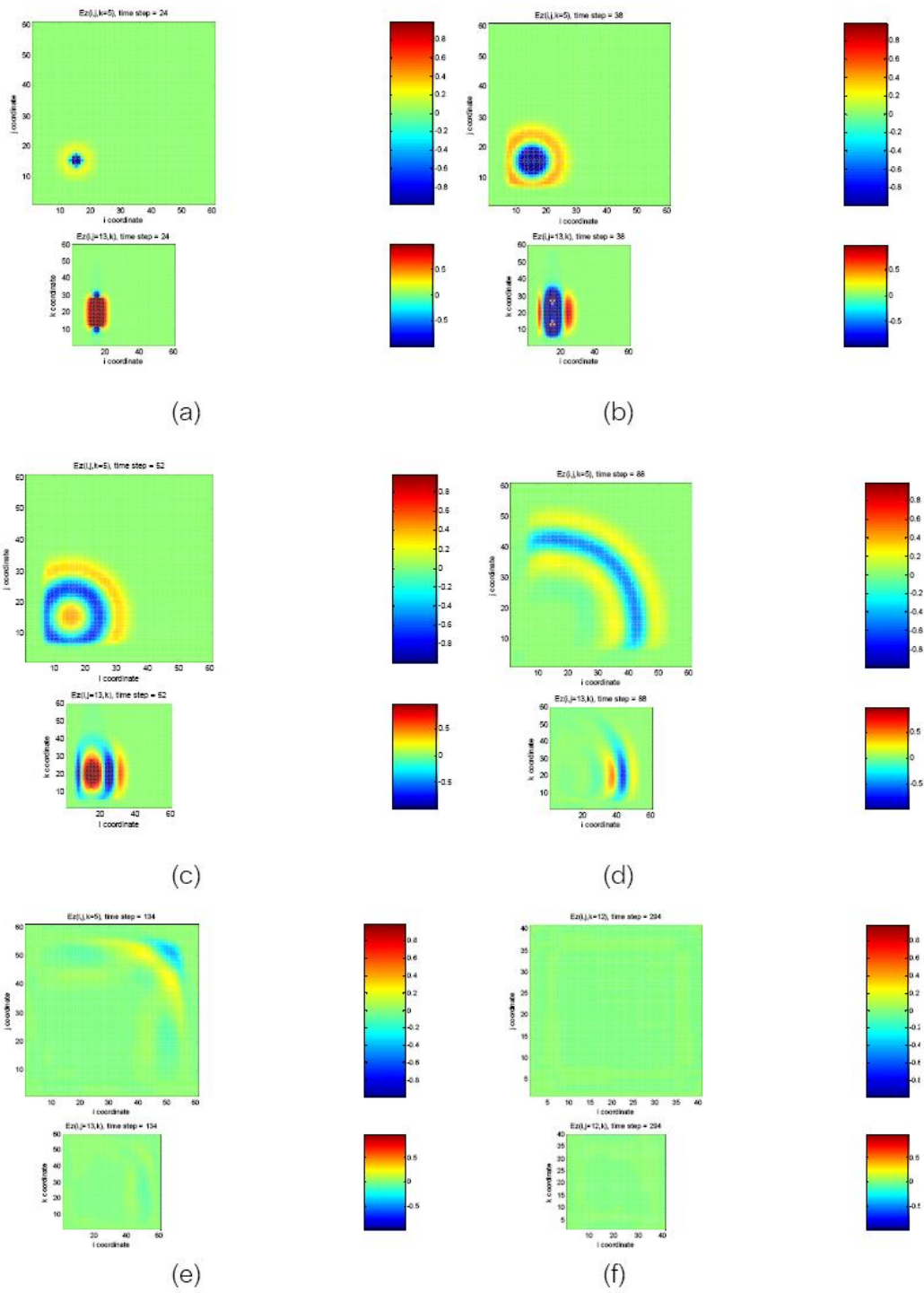
$$C_T = nC \quad (3.11)$$

$$L_T = \frac{L}{n} \quad (3.12)$$

3.9 โปรแกรมจำลองชั้นเชื่อมสมบูรณแบบสามมิติด้วยวิธีผลต่างสลับเนื่องเชิงเวลา (Three Dimensional (3D) Uniaxial Perfectly Matched Layer (UPML) Model by Finite Difference Time Domain (FDTD))

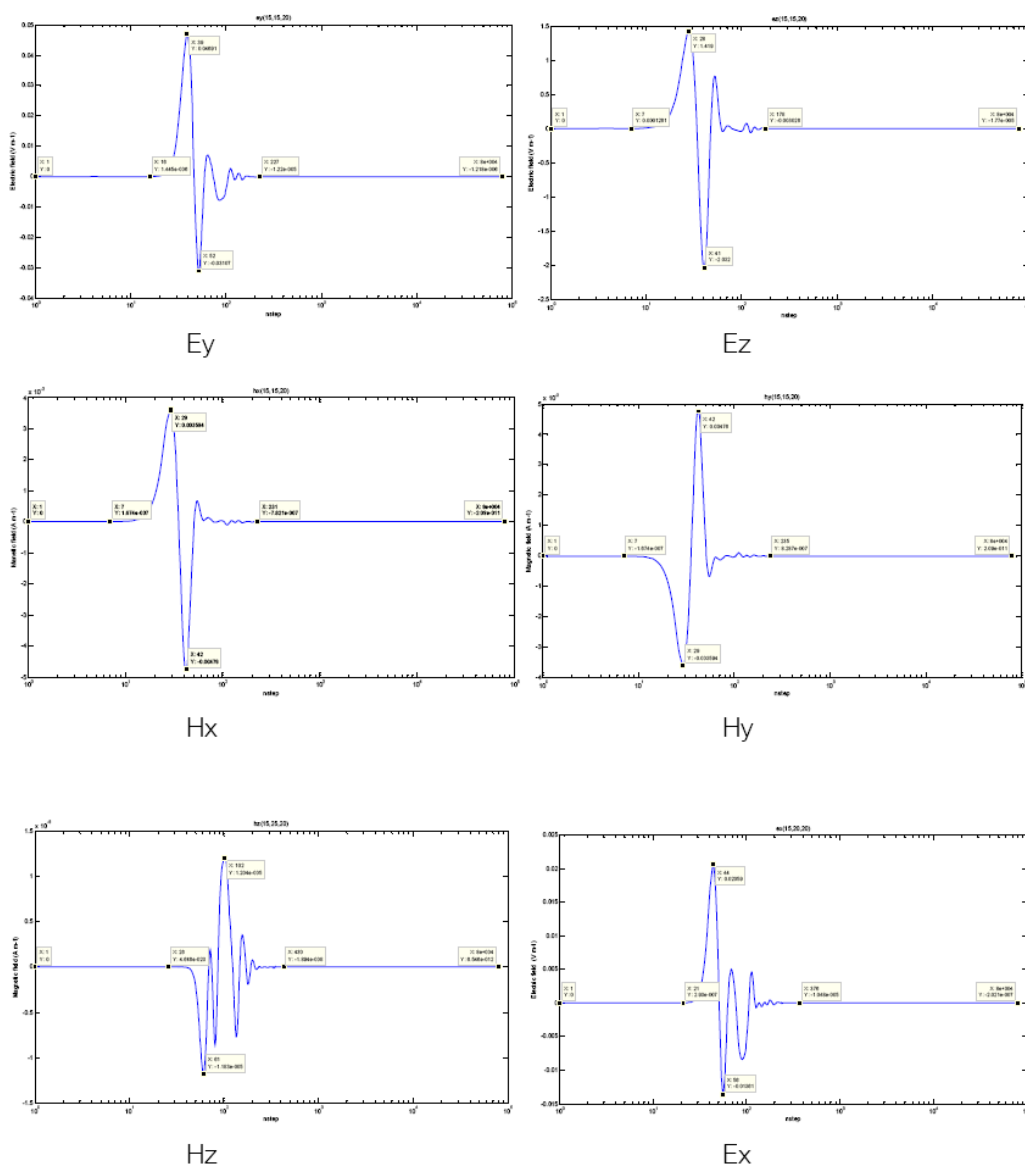
วิธีผลต่างสลับเนื่องเชิงเวลา หรือ Finite-Difference Time-Domain (FDTD) [72] นั้นเป็นการประมาณผลเฉลยโดยการแก้สมการด้วยกระบวนการผลต่างสลับเนื่องในโดเมนทางเวลา (Time Domain) ซึ่งได้มีการนำมาใช้ครั้งแรกในปี ค.ศ.1966 โดย K. S. Yee วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายต่อการประมาณค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในโครงสร้างที่เป็นสามมิติในโดเมนทางเวลา ซึ่งเป็นที่นิยมในการประมาณค่าการเปลี่ยนแปลงของ สมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equations) เนื่องจากสามารถแก้สมการได้โดยตรงโดยไม่ต้องทำการเปลี่ยนสมการไปในรูปแบบอื่นก่อนจึงทำให้ง่ายต่อการหาผลเฉลย โดยอาศัยหลักการการประมาณค่าผลต่างศูนย์กลาง (Central Difference) อันดับ 2 ในปริภูมิ (Space) และเวลา ดังนั้น FDTD จึงเป็นหนึ่งในวิธีที่ได้รับความนิยมในการใช้ทำการคำนวณลักษณะทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

เพื่อความเข้าใจในหลักการมากยิ่งขึ้นจึง ได้ทำการทดลองเขียนโปรแกรมจำลองชั้นเชื่อมสมบูรณ (Uniaxial Perfectly Matched Layer, UPML) แบบสามมิติด้วยวิธีผลต่างสลับเนื่องเชิงเวลา (FDTD) โดยใช้โปรแกรมแมทแลป (Matlab) เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวของคลื่นในตัวกลางต่างๆ โดยได้สร้างให้แหล่งกำเนิด (Source) ประเภทแหล่งจ่ายแบบจุด (Point Source) ในบริเวณตัวกลางประเภทสุญญากาศ (Free Space) แล้วแพร่กระจายออกไปโดยมีขอบเขตเป็น UPML [73] ซึ่งมีคุณสมบัติที่ทำให้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสเป็นศูนย์จึงทำให้คลื่นถูกดูดเมื่อเคลื่อนที่เข้าไปใน UPML (ค่าสนามแม่ไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะมีค่าเป็นศูนย์) ภาพที่ 3.12 แสดงสนามไฟฟ้าที่ช่วงเวลาต่างๆ โดยจะสังเกตได้ว่าสนามไฟฟ้าที่ถูกสร้างจาก แหล่งจ่ายแบบจุด จะถูกดูดซึมทั้งหมดที่ช่วงเวลาที่ 294 ($\Delta t = 5.0035 \text{ ps}$) หรือที่เวลาเท่ากับ $\Delta t \times 294 = 1.410 \text{ ns}$ ดังแสดงในภาพที่ 3.12(f)



ภาพที่ 3.12 ผลการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ในช่วงเวลาที่ (a) 34, (b) 38 (c) 52, (d) 88, (e) 134 และ (f) 294

จากนั้นได้ทำการตรวจสอบว่าโปรแกรมที่สร้างนั้นถูกต้องจริงโดยการ จำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ ไป 80000 ช่วงเวลา แล้วทำการเก็บข้อมูลทั้งหมด 6 จุด ซึ่งในแต่ละจุดที่ทำการวัดจะประกอบไปด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในแนวแกน x, y, z (E_x , E_y , E_z , H_x , H_y และ H_z) ดังแสดงในภาพที่ 21 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประมาณที่ ช่วงเวลาที่ 430 หรือที่เวลาเท่ากับ $\Delta t \times 430 = 2.1515$ ns ทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะมีค่าเป็นศูนย์นั่นคือไม่มีการสะท้อนกลับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากขอบเขต UPML ที่สร้างขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 ผลการการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบโปรแกรม

เพื่อความสะดวกและประหยัดเวลาในการทำวิจัยมากยิ่งขึ้น ภายในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CST Microwave Studio® ซึ่งมีหลักการพื้นฐานมาจากวิธี FDTD นำมาตรวจสอบผลและคำนวณหาค่าองค์ประกอบทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยโครงสร้างทางวัสดุสังเคราะห์ที่ได้ถูกออกแบบและตรวจสอบผลทางทฤษฎีแล้วจะถูกนำมาจำลองผลการทดลองด้วยทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio® โดยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อน (Transmission and Reflection Coefficients, S-Parameter) ที่ได้จากการจำลองการทดลองด้วยโปรแกรมและวิธีประมวลผลข้างต้น จะถูกนำมาคำนวณและสกัด (Extract) ด้วยวิธี Robust Method [19] ซึ่งได้ปรับปรุงมาจากวิธีของ Wier เพื่อนำไปคำนวณหาค่าคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าอื่นๆ ได้อีก เช่น ค่าดัชนีการหักเหของแสง (Index of Refraction), ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Permittivity, ϵ) และค่าความซึมได้ทางแม่เหล็ก (Permeability, μ) [20] และทำการตรวจสอบความถูกต้องของค่าส่วนจริงและส่วนจินตภาพของตัวประกอบเชิงซ้อนดังกล่าวข้างต้น ด้วยความสัมพันธ์ของคราเมอร์-โครนิก (Kramers-Kronig) [21]

บทที่ 4

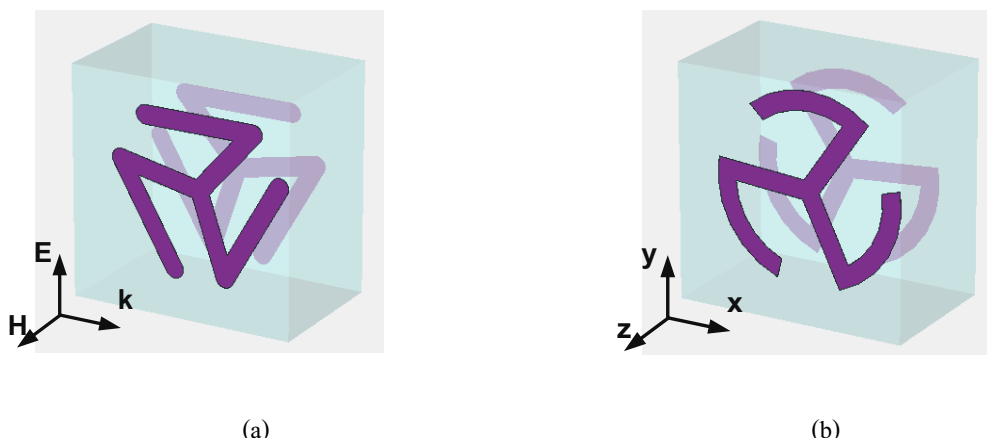
ผลการวิจัย การทดลอง และการวิเคราะห์ผล

หลังจากที่ได้ทำการออกแบบโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ให้มีคุณสมบัติ ไครอล (Chiral) และ ไอโซทรอปิก (Isotropic) แล้วด้วยวิธีทฤษฎีกลุ่ม (Group theory) แล้ว ในขั้นตอนต่อไปจะเป็น การศึกษาการปรับโครงสร้างให้มีคุณสมบัติค่าดัชนีการหักเหของแสงติดลบ (Negative Refractive Index, NRI) โดยใช้หลักการการวิเคราะห์วงจรหรือ Circuit Analysis ซึ่งทั้งนี้คุณสมบัติค่าดัชนีการหักเหของแสงติดลบนี้เราสามารถที่จะควบคุมให้เกิดในช่วงที่เราต้องการใช้งานด้วยการปรับเปลี่ยนลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างเพื่อที่จะให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมกับโครงสร้าง ในส่วนนี้เรา จะนำเสนอการศึกษาผลของการปรับแต่งรวมถึงการจัดวางของโครงสร้างวัสดุเหนือธรรมชาติ ซึ่งการศึกษาในส่วนนี้เราได้ทำการเลือกโครงสร้างของวัสดุเหนือธรรมชาติ C_3 มาศึกษา ทั้งนี้เนื่องจากว่าเป็นโครงสร้างพื้นฐาน ที่ซับซ้อนน้อยที่สุดในกลุ่ม C_n จึงเหมาะแก่การนำมาศึกษาเพื่อเป็นแนวทางในการปรับแต่งโครงสร้างอื่นๆ (C_4 - C_8) ต่อไป

โครงสร้าง C_3 ที่ได้ทำการออกแบบ จะถูกจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio® ซึ่งใช้หลักการพื้นฐานจากวิธีผลต่างสลับเนื่องเชิงเวลา (Finite-Difference Time-Domain, FDTD) เพื่อนำเอาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อน (Transmission and Reflection Coefficients (S_{21} and S_{11} parameters)) ที่ได้จากการจำลองผล ไปคำนวณหาค่า ยังผลของพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Effective Electromagnetic Parameters) [19-20] โดยได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์โดยการนำค่าในส่วนของจำนวนจริง และในส่วนของจินตภาพมาตรวจสอบด้วยความสัมพันธ์ของคราเมอร์-โครนิค (Kramers-Kronig Relations) [21] อัตราการสูญเสียของสัญญาณ (Loss factor) คำนวณจาก $|n_r/n_i|$ เมื่อ n_i คือส่วนจำนวนจินตภาพของค่าดัชนีการหักเหของแสง และ n_r ส่วนจำนวนจริงของค่าดัชนีการหักเหของแสง ซึ่ง เป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งที่ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของโครงสร้าง ซึ่งสามารถแบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ส่วนได้ดังนี้

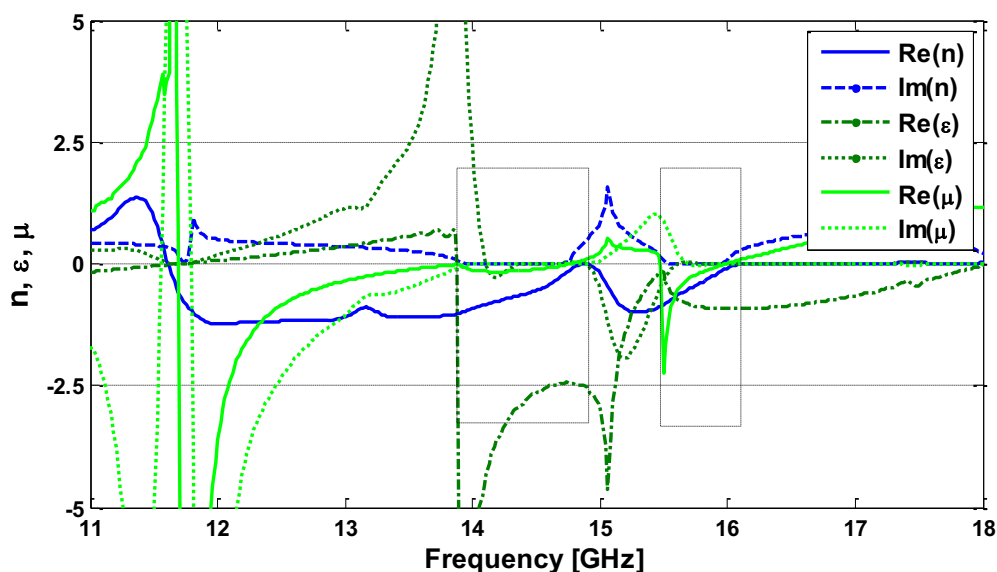
4.1 ลักษณะของแขนย่อย (H2) ต่อลักษณะการส่งผ่านของสัญญาณ

ดังที่ทราบว่าโครงสร้างของตัวสั้นพ้องแบบวงแหวนแยกส่วน (Split Ring Resonator, SRR) นั้นสามารถที่จะทำให้ค่าค่าความซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก (Permeability, μ) และค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Permittivity, ϵ) ที่ติดลบได้ในโครงสร้างเดียวกัน [15, 74] ดังนั้นในการออกแบบโครงสร้างต้นแบบจึงได้นำโครงสร้างของ SRR มาเป็นต้นแบบในออกแบบโครงสร้างของ C_n ในภาพที่ 4.1 แสดงโครงสร้างของ C_3 ทั้ง 2 รูปแบบคือ แบบที่มีแขน H2 โค้ง (Curved) ซึ่งได้ดัดแปลงมาจาก SRR โดยแขนของโครงสร้างจะมีลักษณะโค้งคล้ายกับ SRR และ แบบที่มีแขน H2 ตรง (Straight) โดยในแต่ละวงที่เกิดจากแขน H1 และ H2 ปิดล้อม (Loop) ของทั้งสองโครงสร้าง จะประพฤติตัวเสมือนกับเป็นตัวสั้นพ้องทางแม่เหล็ก (Magnetic Resonator) ดังนั้นภายใน 1 โครงสร้างของ C_3 จะประกอบด้วยตัวสั้นพ้องทางแม่เหล็ก 3 ชุดย่อยที่ต่อขนานกัน



ภาพที่ 4.1 แสดงโครงสร้างในกลุ่มของ C_3 ที่ได้ทำการออกแบบที่มีแขนย่อย H2 (a) โค้ง (Curved) และ (b) ตรง (Straight) โดยขนาดของเซลล์หน่วย (Unit Cell) ของทั้งสองโครงสร้างมีขนาดที่เท่ากัน คือ $10.2\text{mm} \times 10.2\text{mm} \times 6.34\text{mm}$ ทำจากทองแดง (Copper) โดยกำหนดให้ขนาดของความกว้างของแขน (w) = 0.85 mm , $H1 = 3.83\text{ mm}$, $H2 = 5.1\text{ mm}$ ความหนาของโครงสร้างเท่ากับ 0.0112 mm และในกรณีของ C_3 ที่มีแขนย่อย H2 โค้งนั้นขนาดของรัศมีเท่ากับ 3.8 mm โดยกำหนดขอบเขตเป็น PEC และ PMC ในทิศทางที่ตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามลำดับ ระยะห่างระหว่าง 2 โครงสร้าง (d) เท่ากับ 3.175 mm

จากผลการจำลองผลทดลองของโครงสร้าง C_3 แบบแขน H2 ตรงแล้วนำค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและสะท้อน ไปทำการคำนวณหา ค่ายังผลของพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าและดัชนีการหักเหของแสงแสดงในภาพที่ 4.2 พบว่าเกิดการคาบเกี่ยวกัน (Overlap) กันของ $\epsilon_r < 0$ และ $\mu_r < 0$ 2 บริเวณ (บริเวณที่ทำการรอบสี่เหลี่ยม) โดยในช่วงที่ 2 ที่เกิดการคาบเกี่ยวกันคือในช่วงความถี่ 15.5GHz ถึง 16.0GHz ซึ่งเป็นการคาบเกี่ยวกันระหว่างการสั่นพ้องทางไฟฟ้า (Electric Resonance ($\omega = \omega_{e0}$)) และการสั่นพ้องทางแม่เหล็ก (Magnetic Resonance ($\omega = \omega_{m0}$)) ในขณะที่การคาบเกี่ยวกันในช่วงแรกที่เกิดบริเวณ 13.8GHz to 14.8GHz นั้นเป็นการคาบเกี่ยวกันของการสั่นพ้องทางไฟฟ้า และ ค่า μ_r ที่ติดลบต่ำๆ บริเวณที่เกิดการคาบเกี่ยวกันทั้งสองบริเวณก่อให้เกิดค่าดัชนีการหักเหของแสงที่ติดลบตามสมมติฐานของ Veselago ซึ่งเรียกการเกิดดัชนีการหักเหของแสงที่ติดลบนี้นว่า การติดลบที่เกิดจากค่า ϵ_r และ μ_r ติดลบพร้อมกัน (Double Negative NRI) [75] เมื่อพิจารณาบริเวณก่อนที่จะเกิดดัชนีการหักเหของแสงที่ติดลบในทั้งสองบริเวณที่เกิด Double Negative NRI พบว่ามีการเกิดดัชนีการหักเหของแสงติดลบที่บริเวณ $11.7\text{GHz} - 13.8\text{GHz}$ และ $15\text{GHz} - 15.5\text{GHz}$ อีก ซึ่งเกิดจากค่าในส่วนของจินตภาพติดลบซึ่งสามารถทำให้เกิดความเร็วเฟสติดลบได้ (Negative Phase Velocity) ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไข $\epsilon_r \mu_i + \mu_r \epsilon_i < 0$ [46] โดยดัชนีการหักเหของแสงติดลบประเภทนี้จะถูกเรียกว่าการติดลบที่เกิดจากค่า ϵ_r หรือ μ_r ติดลบ (Single Negative NRI)



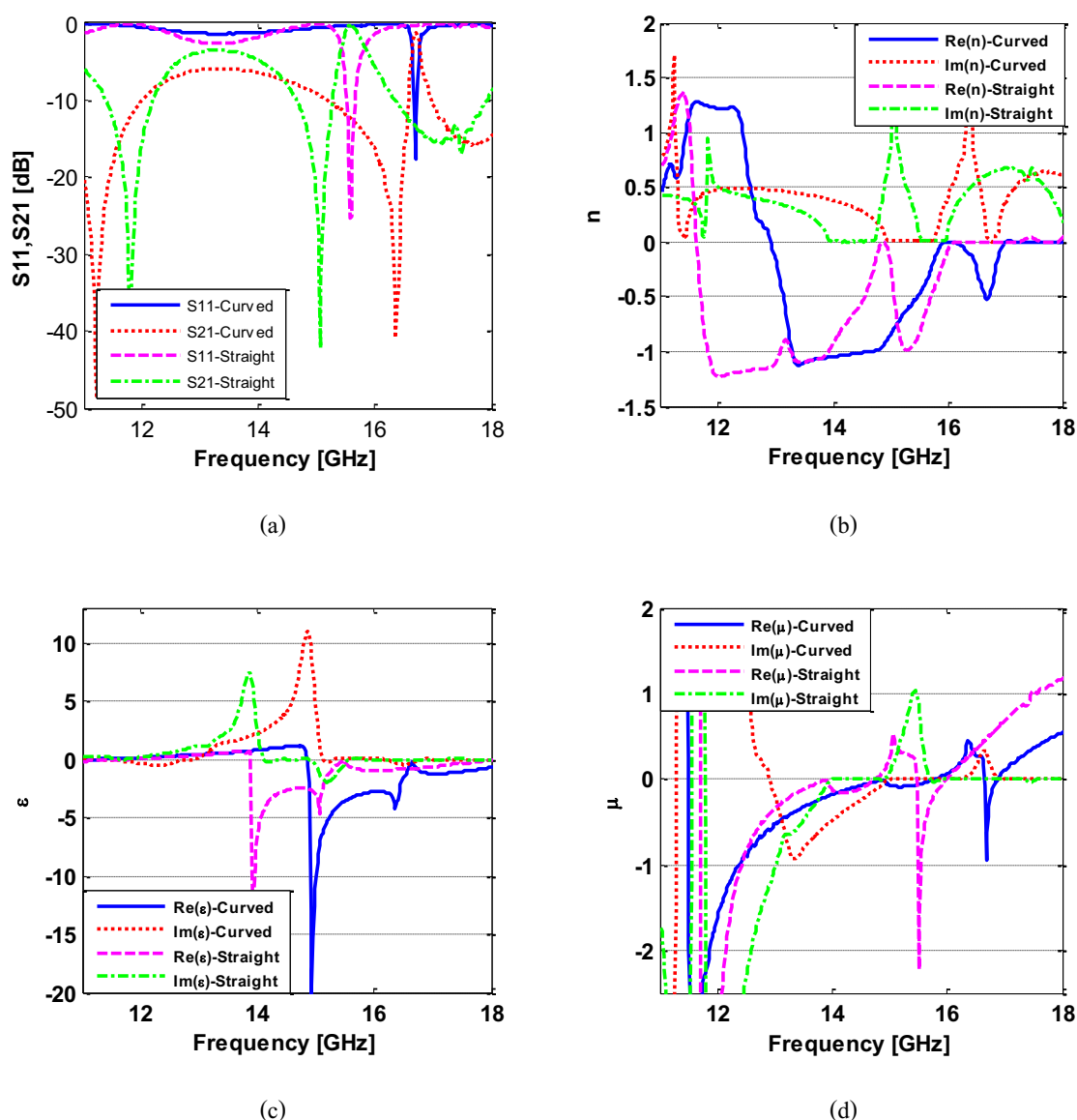
ภาพที่ 4.2 แสดงค่ายังผลของพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า, ค่าความซบซึ่มได้ทางแม่เหล็ก (μ), ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (ϵ) และ ดัชนีการหักเหของแสง (n) ของโครงสร้าง C_3 ที่มีแกน H2 แบบตรง

ในภาพที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบการวาดกราฟค่าพารามิเตอร์ต่างๆของโครงสร้าง C_3 ในทั้งสองแบบ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ของทั้งสองโครงสร้างได้แสดงในภาพที่ 4.3(a) ค่ายังผลของพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า, ค่าความซบซึ่มได้ทางแม่เหล็ก (μ), ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (ϵ) และ ดัชนีการหักเหของแสง (n) ในส่วนจำนวนจริงและจินตภาพได้แสดงในภาพที่ 4.3(b-d) ตามลำดับ และ อัตราการสูญเสียของสัญญาณ (Loss Factor) ได้แสดงในภาพที่ 4.3(e)

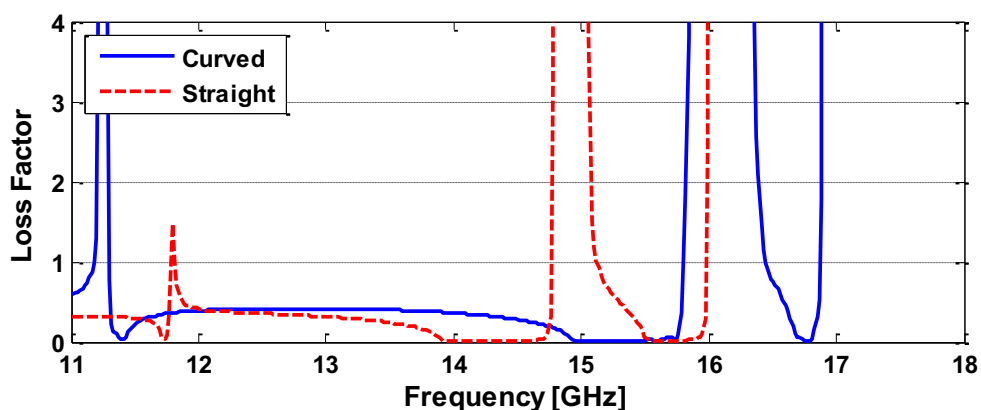
ลักษณะของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและสะท้อนและค่ายังผลของพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้างทั้งสองแบบนั้นให้ผลออกมาที่คล้ายคลึงกัน พบว่าในช่วงที่เกิดดัชนีการหักเหของแสงติดลบของโครงสร้าง C_3 ที่มีแกน H2 แบบตรง (15.5GHz - 16.0GHz) นั้นจะเกิดบริเวณที่ต่ำกว่า ในกรณีของโครงสร้าง C_3 ที่มีแกน H2 แบบโค้ง และพบว่าแถบความถี่ผ่าน (Passband) ของกรณีของโครงสร้าง C_3 ที่มีแกน H2 แบบตรงนั้นมีช่วงที่กว้างกว่าโครงสร้าง C_3 ที่มีแกน H2 แบบโค้ง (16.6GHz - 16.8GHz) สาเหตุของการเกิด NRI ในช่วงที่ต่างกันของทั้งสองโครงสร้างสามารถอธิบายได้จากตำแหน่งการเกิด $-\mu$ และ $-\epsilon$ ตำแหน่งของการเกิด $-\mu$ นั้นสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (3.8) ช่วงความถี่ที่เกิดการสั่นพ้องทางแม่เหล็ก (Magnetic Resonance, ω_{0m}) ของโครงสร้าง C_3 ที่มีแกน H2 แบบตรงนั้นจะต่ำกว่าของโครงสร้าง C_3 ที่มีแกน H2 แบบโค้งเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของโครงสร้าง SRR แบบเดี่ยว ของกลุ่มของ M. Kafesaki ที่ทำการศึกษเปรียบเทียบกันระหว่าง SRR แบบสี่เหลี่ยม (Square SRR) และ SRR แบบวงกลม (Circular SRR) [74]. สาเหตุหลักที่ทำให้ค่า ω_{0m} ของโครงสร้าง C_3 ที่มีแกน H2 แบบตรงนั้นเกิดในช่วงความถี่ที่สูงกว่านั้นคือมีพื้นที่ในการเกิดค่าตัวเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุมากกว่าโครงสร้าง C_3 ที่มีแกน H2 แบบโค้ง จึงส่งผลถึงค่า ω_{0m} โดยสามารถคำนวณหาความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของตัวสั่นพ้องในแต่ละรูปของโครงสร้าง C_3 ได้จากสมการที่ (3.9) ซึ่งเป็น

สมการคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของเส้นลวดตัวนำที่ขดเป็นสามเหลี่ยม และสามารถหาค่าความจุไฟฟ้า (3.10) ได้จากการคาบเกี่ยวกันของแกน H1 และ H2 ของโครงสร้างที่แสดงในภาพที่ 4.1

อัตราการสูญเสียของสัญญาณ หรือ Loss Factor เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญอย่างยิ่งต่อการพิจารณาของ ลักษณะแถบความถี่ผ่านของช่วงที่เกิดดัชนีการหักเหของแสงติดลบว่ามีคุณสมบัติที่ดีหรือไม่ จากการจำลองผลการทดลองพบว่าในช่วงที่พบ Double Negative NRI ของโครงสร้างทั้งสองแบบนี้มีอัตราการสูญเสียของสัญญาณต่ำ หรือมีค่าในเทอมจินตภาพของดัชนีการหักเหของแสงน้อยมาก (ใกล้เคียงกับศูนย์)



ภาพที่ 4.3 แสดง (a) ลักษณะของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและสะท้อน (S_{21} และ S_{11}), (b) ค่าดัชนีหักเหของแสง (n) (c) ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (ϵ), (d) ค่าความซึมทางแม่เหล็ก (μ) ของโครงสร้าง C_3 แบบที่มีแกน H2 ตรง (Straight) และแกน โค้ง (Curved)



(e)

ภาพที่ 4.3 แสดง (e) อัตราการสูญเสียสัญญาณ (Loss Factor) ของ โครงสร้าง C_3 แบบที่มีแกน H2 ตรง (Straight) และแกน โค้ง (Curved) (ต่อ)

ดังจะเห็นได้จากการแสดงผลเปรียบเทียบของลักษณะของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและสะท้อน ค่ายังผลของพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า และค่าดัชนีการหักเหของแสงของโครงสร้างทั้งสองแบบนี้ให้ผลออกมาที่คล้ายคลึงกัน ดังนั้นภายในงานวิจัยนี้เราจึงเลือกที่จะศึกษาโครงสร้างแบบ C_n แบบที่มีแกน H2 ตรง ทั้งนี้เนื่องจากเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าและค่าความจุไฟฟ้า และความสะดวกในการออกแบบโครงสร้าง

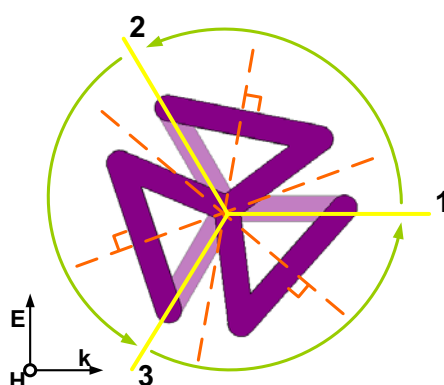
4.2 การศึกษาความสัมพันธ์ของคุณสมบัติไอโซทรอปิกของการจัดวางโครงสร้างกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Isotropic Orientation Relative to the EM Field)

ความสัมพันธ์ของการจัดวางตัวของโครงสร้างกับทิศทางการเดินทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และการโพลาไรเซชันนั้นมีผลต่อลักษณะของการส่งผ่านและสะท้อน (Transmission and Reflection Characteristics) และค่ายังผลของพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าต่างๆ [64, 74, 76] จากการศึกษาของ Papakostas พบว่าเมื่อคลื่นเข้าไปยังแผ่นระนาบของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ที่มีคุณสมบัติไอโซทรอปิกโดยทำมุมกับระนาบที่ต่างกันจะทำให้ได้ลักษณะของการส่งผ่านและสะท้อนที่แตกต่างกัน [64] และผลจากการทบทวนของการส่งคลื่นสัญญาณไปทางซ้ายและทางขวาของเส้นตั้งฉากกับระนาบ โครงสร้างนั้นจะให้ผลที่เหมือนกันแต่ในลักษณะที่กลับทิศกัน และในทำนองเดียวกันกับกรณีที่ส่งคลื่นเข้าในทิศทางขนานกับระนาบ การวางตัวของโครงสร้างจึงมีผลต่อ ลักษณะของการส่งผ่านและสะท้อนทั้งนี้เนื่องจากว่าเมื่อจ่ายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปชนกับโครงสร้าง ซึ่งผลจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าวิ่งไหลไปตามยาวของโครงสร้าง และด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและสะท้อนที่ได้นั้นแตกต่างกันเมื่อโครงสร้างเกิดการจัดวางตัวที่แตกต่างกัน เพราะว่าจะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางที่ต่างกันซึ่งจะส่งผลไปยัง ช่วงความถี่การสั่นพ้องทางแม่เหล็ก (Magnetic Resonance) ด้วย [76] จึงทำให้ผลของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและสะท้อนนั้นได้ออกมาแตกต่างกัน และยัง

ส่งผลไปถึงค่า μ , ε และ n ด้วย เนื่องจากว่าค่าเหล่านั้นล้วนหาได้มาจากการคำนวณผลจากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและสะท้อนที่ได้จากการจำลองผลการทดลองของโครงสร้าง

วิธีที่ดีที่สุดในการจัดวางโครงสร้างของวัสดุเหนือธรรมชาติที่รู้จักกันดี SRR และ Wire [2, 24] จะต้องวางโครงสร้างให้ทิศทางของการเดินทางของคลื่น (Incident Wave Propagation Direction) เคลื่อนที่ผ่านระนาบของโครงสร้าง นั่นคือ ทิศทางของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าจะต้องมีทิศทางที่ตั้งฉากและขนานกับระนาบของโครงสร้างตามลำดับ จากการศึกษาในส่วนที่แล้วได้กล่าวถึงวิธีการที่ก่อให้เกิดดัชนีการหักเหของแสงติดลบแล้ว ในส่วนนี้จะทำการกำหนดขอบเขตให้เหมือนกับ SRR และ Wire ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว จากบทที่ 3 เราได้กล่าวถึงคุณสมบัติของโครงสร้างในกลุ่ม C_n ว่ามีคุณสมบัติของไอโซทรอปิกในระนาบของโครงสร้าง ดังนั้นในการศึกษาในส่วนนี้จะเน้นศึกษาในเรื่องการจัดวางโครงสร้าง (หมุนโครงสร้างในระนาบ) ในระนาบว่ามีผลต่อคุณสมบัติของการส่งผ่านและสะท้อนของสัญญาณอย่างไร [64] ซึ่งได้แบ่งการศึกษานี้ออกเป็น 3 ส่วนย่อยดังนี้

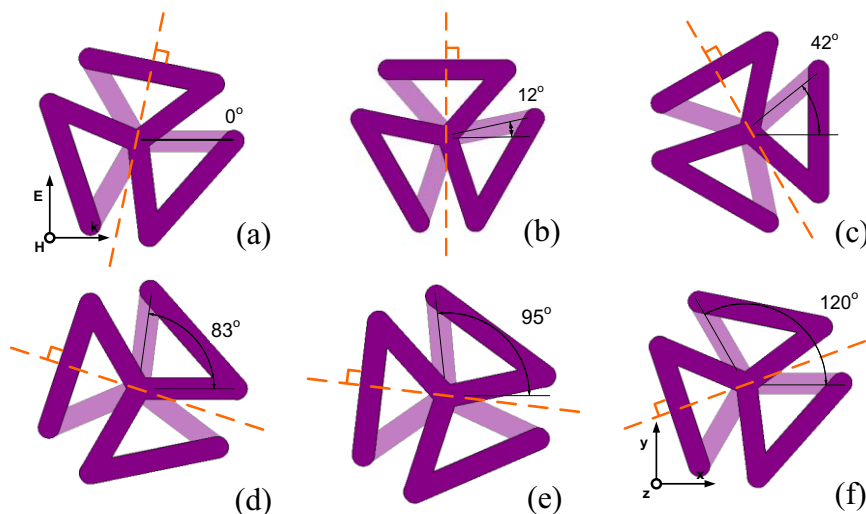
4.2.1 ความสมมาตรของโครงสร้างและการจัดวางโครงสร้างที่เหมาะสม (Symmetry Part and Optimized Placement)



ภาพที่ 4.4 แสดงลักษณะสมมาตร ($1 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 3$ และ $3 \rightarrow 1$) ของโครงสร้าง C_3 พร้อมกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (k) และ สนามแม่เหล็ก (H) และสนามไฟฟ้า (E)

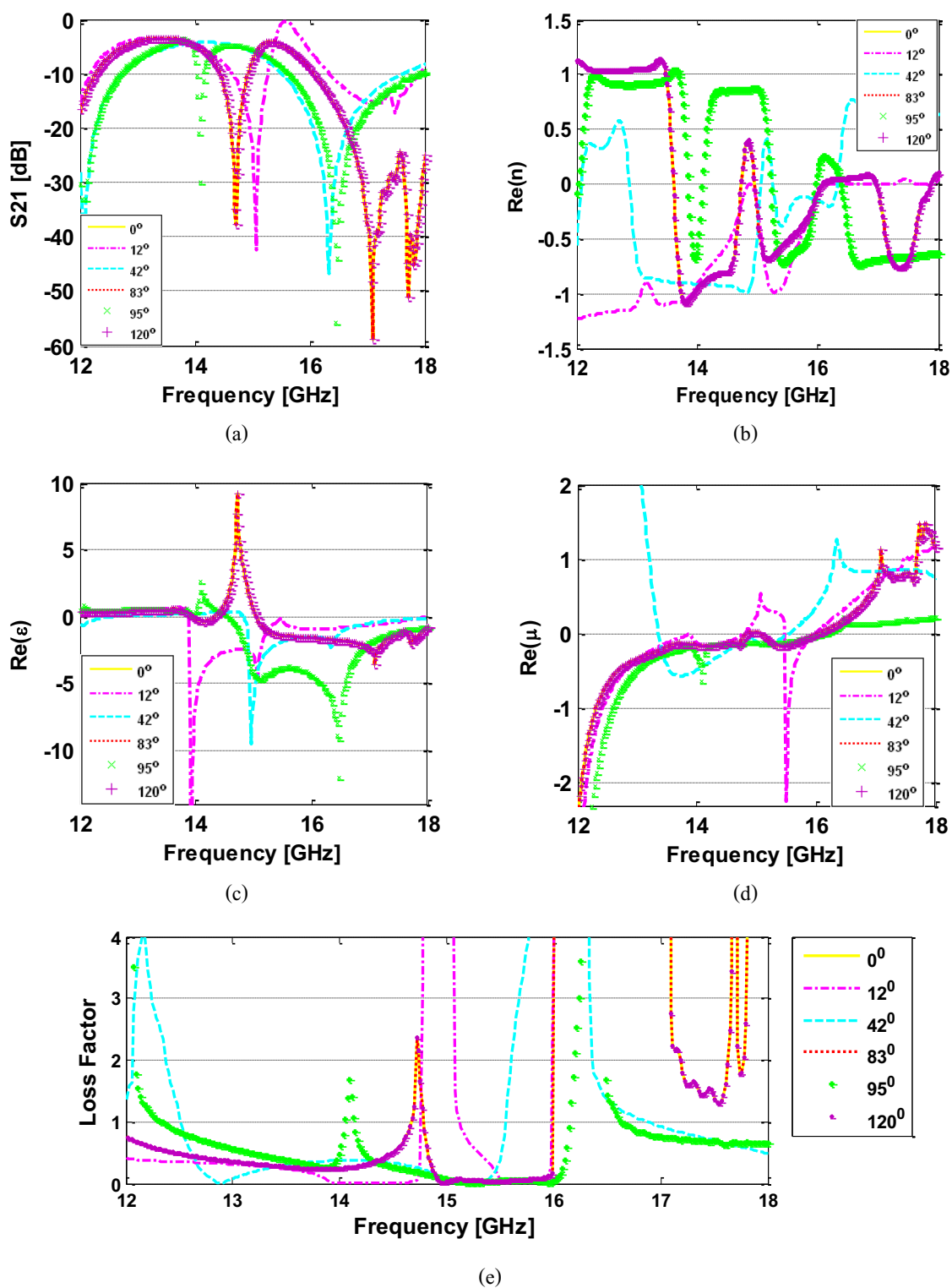
โครงสร้าง C_3 ที่แสดงในภาพที่ 4.4 ได้ถูกแบ่งออกเป็นสามส่วนที่มีความสมมาตรกัน มุมระหว่าง 1 และ 2, 2 และ 3 และ 3 และ 1 เท่ากับ 120 องศา เส้นประตั้งฉากกับแกน H_2 ของโครงสร้างแสดงถึงเส้นสมมาตรที่แบ่งให้โครงสร้างออกเป็นสองส่วนที่เท่ากัน โดยเราจะขอเรียกว่าเส้นภาพสะท้อน หรือ Mirror Line ในส่วนนี้เราจะทำการศึกษการจัดวางโครงสร้างของ C_3 ในลักษณะที่แตกต่างกัน 6 โครงสร้าง โดยทำการหมุนโครงสร้างจาก 0 ถึง 120 องศา เพื่อศึกษาความสมมาตรของโครงสร้าง โดยทิศทางของ k , E และ H ได้แสดงในภาพที่ 4.4 และ 4.5

โครงสร้าง C_3 ได้ถูกทำการจัดวางตัวในมุมที่แตกต่างกัน 6 มุม โดยทำการหมุนโครงสร้างจาก 0 องศาไปในทิศทางเข็มนาฬิกา ไปจนถึง 120 องศา ซึ่งมีดังนี้คือ (a) 0 องศา, (b) 12 องศา, (c) 42 องศา, (d) 83 องศา (e) 95 องศา และ (f) 120 องศา โดยให้แกน H1 เป็นแกนอ้างอิงโดยมีทิศทางขนานกับ k ที่มุม 0 องศา เมื่อพิจารณาแล้วจะพบว่าโครงสร้างการจัดวางที่มุม 0 องศา และ 120 องศา นั้นเป็นตำแหน่งเดียวกัน โครงสร้างที่การจัดวางที่มุม 83 องศา สามารถจัดกลุ่มกับโครงสร้างที่จัดวางที่มุม 0 องศา และ 120 องศา เนื่องจากคุณสมบัติของความ เป็นซึ่งกันและกัน (Reciprocal) ของการจัดวาง ซึ่งจะได้อธิบายในส่วนที่ 4.2.3 การจัดวางโครงสร้างที่มุม 12 องศา นั้นเกิดในกรณีของ Mirror Line นั้นมีทิศที่ตั้งฉากกับ k แต่ในกรณีของการจัดวางโครงสร้างที่มุม 42 องศา นั้นทิศ ของ k มีทิศเดียวกันกับ Mirror Line และในกรณีของการจัดวางโครงสร้างที่มุม 95 องศา นั้นก็จะขยับจากการจัดวางโครงสร้างที่มุม 42 องศา เล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 แสดงการจัดวางโครงสร้าง C_3 ในมุมที่แตกต่างกัน 6 มุม จาก 0 ถึง 120 (a) 0 องศา, (b) 12 องศา, (c) 42 องศา, (d) 83 องศา (e) 95 องศา และ (f) 120 องศา

ผลของการจำลองผลการทดลองของการจัดวางโครงสร้างทั้ง 6 มุมได้แสดงอยู่ในภาพที่ 4.6 ซึ่งประกอบด้วย S_{21} ส่วนจำนวนจริงของดัชนีการหักเหของแสง ϵ , μ และ อัตราการสูญเสียสัญญาณ (Loss Factor) โดยโครงสร้างได้ถูกออกแบบให้เกิดค่าดัชนีการหักเหของแสงที่บริเวณ 15 GHz โดยจะได้พิจารณา พร้อมกับอัตราการสูญเสียของสัญญาณซึ่งดูจากในส่วนของจำนวนจินตภาพของค่าดัชนีการหักเหของแสง เพื่อคุณสมบัติที่ดีของโครงสร้างเราไม่ต้องการให้ค่าในส่วนจินตภาพนี้สูงเกินไป โดยภายในงานวิจัยนี้จะพิจารณา ค่าดัชนีการหักเหของแสงที่เฉพาะบริเวณที่มีอัตราการสูญเสียที่มีค่าต่ำกว่า 1



ภาพที่ 4.6 แสดง (a) พารามิเตอร์ S_{21} , (b) ส่วนจำนวนจริงของดัชนีการหักเหของแสง (n), (c) ส่วนจริงของ μ , (d) ส่วนจริงของ ϵ และ (e) อัตราการสูญเสียสัญญาณ (Loss Factor) ของการจัดวางโครงสร้าง C_3 ทั้ง 6 มุมที่แสดงในภาพที่ 3.4

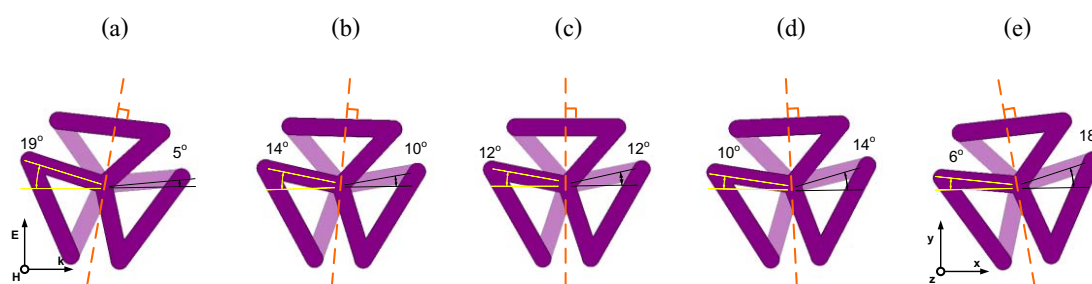
ภาพที่ 4.6(b) ได้แสดงบริเวณของแถบความถี่ผ่านที่เกิด Double Negative NRI ซึ่งอยู่ในช่วง 14 GHz ถึง 16 GHz จะสามารถสังเกตได้ว่าผลของการจัดวางโครงสร้างที่มุม 0, 120 และ 83 องศา นั้นมีลักษณะที่เหมือนกัน (Identical) คือเกิดแถบความถี่ผ่านของ Double Negative NRI ช่วงความถี่ 13.96 GHz ถึง 14.36 GHz และ 15.06 GHz ถึง 15.99 GHz แม้ว่าผลของลักษณะของการส่งผ่านสัญญาณของการจัดวางโครงสร้างที่มุม 42 องศาและ 95 องศา นั้นจะให้ผลที่มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน (ภาพที่ 4.6(a)) แต่อย่างไรก็ตามผลของค่ายังผลของพารามิเตอร์ ϵ และ μ นั้นแตกต่างกันเนื่องจากได้ค่า n ที่แตกต่างกัน โดยจะต้องคำนึงด้วยว่าใช้ว่าทุกแถบความถี่ผ่านของ S_{21} นั้นจะเกิดจากค่าดัชนีการหักเหของแสงติดลบเสมอไป ดังนั้นจึงจะต้องพิจารณาค่ายังผลของพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าอื่นๆประกอบด้วย โดย Double Negative NRI ของการจัดวางโครงสร้างที่มุม 12 องศา นั้นมีความเด่นชัดกว่าในทุกกรณีเนื่องจากว่ามีการสั้นพ้องทางแม่เหล็กที่ต่ำกว่าในทุกกรณี (Strong Magnetic Response) ในบริเวณที่ 15.5 GHz ดังแสดงในภาพที่ 4.6(e) ช่วงของการเกิดค่าดัชนีการหักเหของแสงติดลบที่ผ่านการพิจารณาประกอบกับอัตราการสูญเสียของสัญญาณที่มีค่าน้อยกว่า 1 ของโครงสร้างที่มีการจัดวางที่มุมต่างๆทั้ง 6 มุม ได้สรุปอยู่ในที่ 4.1 แม้ว่าจะพบการเกิดช่วงที่มีค่าดัชนีการหักเหของแสงติดลบที่มีลักษณะที่ดีในทุกโครงสร้างซึ่งเป็นการสนับสนุนว่าโครงสร้างของ C_3 นั้นมีคุณสมบัติไอโซทรอปิกก็ตาม แต่ว่าโครงสร้างของ C_3 ที่การจัดวางโครงสร้างที่มุม 12 องศาที่มีทิศของ k ตั้งฉากกับ Mirror Line มีลักษณะของ Double Negative NRI ที่ดีที่สุด

ตารางที่ 4.1 แสดงช่วงความถี่ที่เกิดแถบผ่านของดัชนีหักเหของแสงติดลบของโครงสร้าง C_3 ในการจัดวางที่มุม 0, 12, 42, 83, 95 และ 120 องศา

Angle (Degree)	Double Negative NRI Bands (where Loss Factor < 1)
0	13.96-14.34, 15.06-15.99
12	13.90-14.76, 15.50-15.97
42	14.81-15.00, 15.20-15.50
83	13.96-14.36, 15.06-15.99
95	15.21-15.95
120	13.96-14.36, 15.06-15.99

4.2.2 การจัดวางโครงสร้างในมุมต่างๆรอบโครงสร้างที่มีการจัดวางที่เหมาะสม (Angles Variation around the Potential Placement)

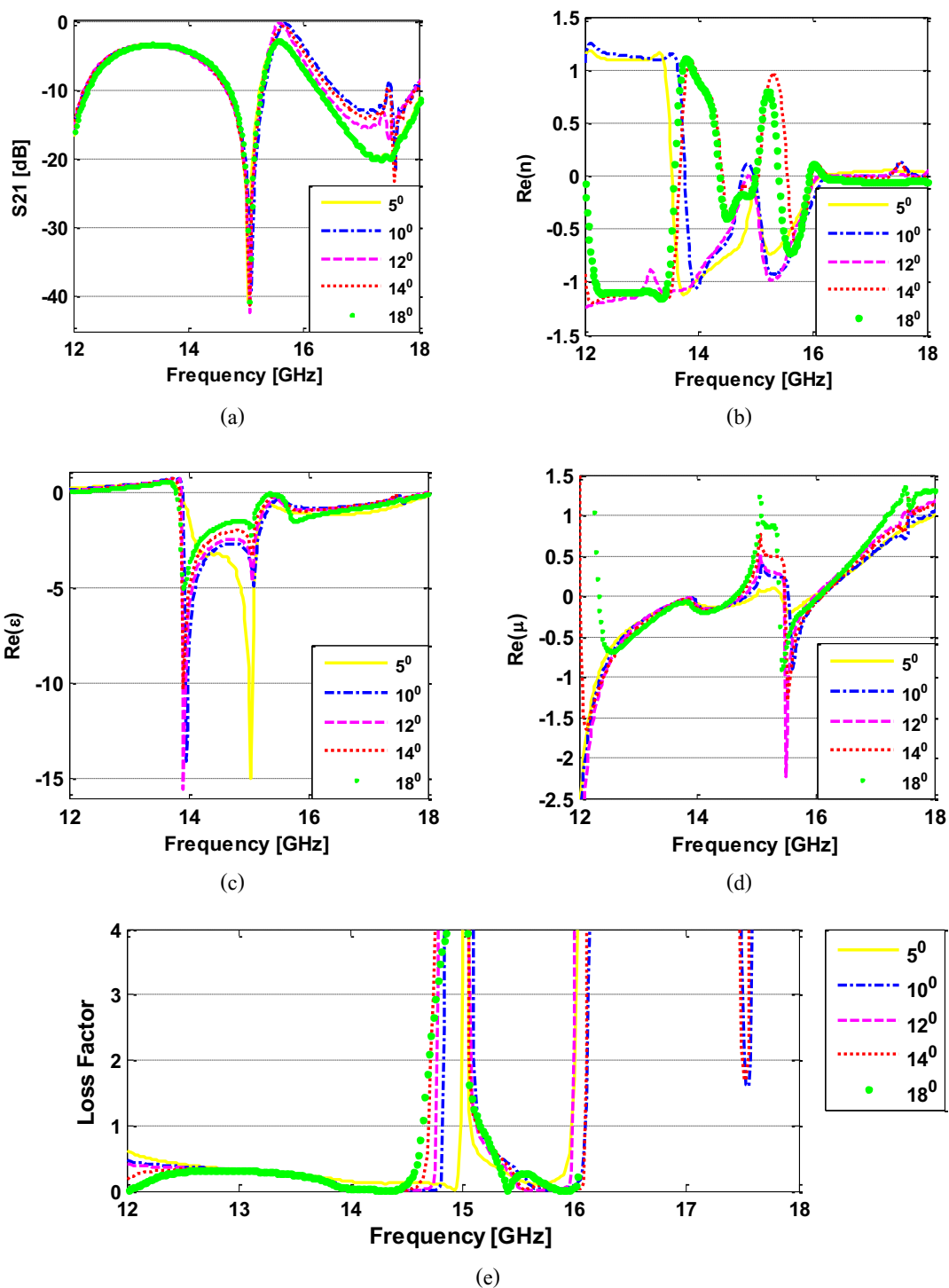
ในส่วนนี้จะทำการศึกษาถึงช่วงของการเกิดค่าดัชนีการหักเหของแสงติดลบของโครงสร้าง C_3 ที่มีการจัดวางในมุมต่างๆใกล้เคียงกับมุมที่สนใจคือที่โครงสร้างที่จัดวางที่มุม 12 องศา ซึ่งได้ศึกษาในส่วนที่แล้ว ซึ่งแสดงในภาพที่ 4.7 โดยจะทำการพิจารณาที่ 5 มุม ดังนี้ 5, 10, 12, 14 และ 18 องศา



ภาพที่ 4.7 การจัดวางโครงสร้าง C_3 ที่มุมต่างๆตั้งแต่ 5 องศา ถึง 18 องศา (a) 5 องศา, (b) 10 องศา, (c) 12 องศา, (d) 15 องศา และ (f) 18 องศา

ผลของการจำลองผลการทดลองของการจัดวางโครงสร้างทั้ง 5 มุม ได้แสดงอยู่ในภาพที่ 4.7 ซึ่งประกอบด้วย S_{21} ส่วนจำนวนจริงของดัชนีการหักเหของแสง ϵ , μ และ อัตราการสูญเสียของสัญญาณ (Loss Factor) ในกรณีที่มีการจัดวางโครงสร้างที่มุม 10 องศาและ 14 องศา นั้นสามารถพิจารณาได้ว่ามีคุณสมบัติ Reciprocal กันจากการหมุนโครงสร้างรอบ Mirror Line ของโครงสร้างที่มุม 12 องศา ส่วนในกรณีของ 5 องศา และ 18 องศา นั้น มีลักษณะการจัดวางที่ใกล้เคียงกัน ต่างกันเพียง 1 องศา โดยมีโครงสร้างที่ 12 องศาเป็นโครงสร้างอ้างอิง

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงมุมในการจัดวางโครงสร้างภายในช่วง 13 องศา (5 องศา – 18 องศา) ของโครงสร้าง C_3 พบว่าค่าพารามิเตอร์ในส่วนจำนวนจริงของ μ ของในทุกรณีนี้นั้นมีลักษณะที่คล้ายกัน และในส่วนจำนวนจริงของ ϵ ก็มีลักษณะที่คล้ายกันเช่นกัน ยกเว้นในกรณีที่มีมุม 5 องศา พบว่าตำแหน่งที่เกิดตำแหน่งต่ำสุดของการสั่นพ้องทางแม่เหล็ก (Electric Resonance) นั้นเกิดในช่วงความถี่ที่สูงกว่าในทุกรณีนี้นี้ ซึ่งคาดว่าจะมาจากคุณสมบัติของ ไครอลิตี ดังจะสามารถสังเกตได้จากค่า n ในภาพที่ 4.8(b) นั้นที่มีลักษณะที่กลับทิศกันของโครงสร้างที่มีการจัดวางตัวอยู่ฝั่งซ้ายและฝั่งขวาของ 12 องศา โดยคุณสมบัติด้านมือ (Handedness) ของไครอลิตีนั้นจะมีอิทธิพลต่อการหมุนของทิศทางโพลาไรเซชันของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนตัวผ่านโครงสร้าง ซึ่งจะส่งผลถึงคุณสมบัติของการส่งผ่านและการสะท้อนของสัญญาณ [77] ในตารางที่ 4.2 ได้แสดงช่วงที่เกิดค่าดัชนีการหักเหของแสงติดลบที่ผ่านการพิจารณาประกอบกับ อัตราการสูญเสียของสัญญาณ ที่มีค่าน้อยกว่า 1 ของโครงสร้างที่มีการจัดวางที่มุมต่างๆทั้ง 5 มุม



ภาพที่ 4.8 แสดง (a) พารามิเตอร์ S_{21} , (b) ส่วนจำนวนจริงของดัชนีการหักเหของแสง (n), (c) ส่วนจริงของ μ , (d) ส่วนจริงของ ϵ และ (e) อัตราการสูญเสียของสัญญาณ (Loss Factor) ของการจัดวางโครงสร้าง C_3 ทั้ง 5 มุมที่แสดงในภาพที่ 4.7

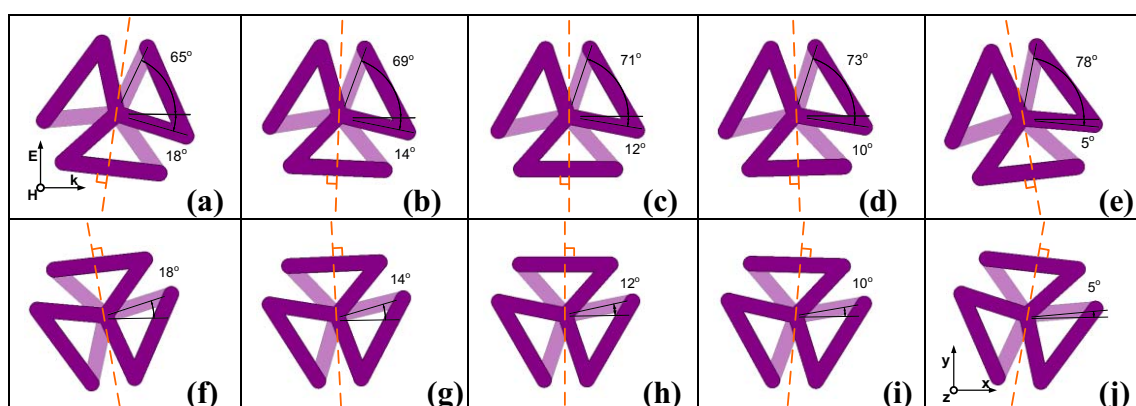
ตารางที่ 4.2 แสดงช่วงความถี่ที่เกิดแถบผ่านของดัชนีหักเหของแสงคิดลบของโครงสร้าง C_3 ในการจัดวางที่มุม 5, 10, 12, 14 และ 18 องศา

Angle (Degree)	Double Negative NRI Bands (where Loss Factor < 1)
5	13.90-14.93, 15.46-15.97
10	13.94-14.81, 15.52-16.09
12	13.90-14.76, 15.50-15.97
14	13.67-14.68, 15.52-16.09
18	13.81-14.62, 15.38-16.03

4.2.3 การจัดวางโครงสร้างที่มีคุณสมบัติที่เป็นซึ่งกันและกัน (Reciprocal Placement)

จากการศึกษาในส่วนที่แล้วได้กล่าวถึงการจัดวางที่มีลักษณะเป็น Reciprocal (เรซิโปรคัล) กันของโครงสร้างที่จัดวางโครงสร้างที่มุม 10 องศา และ 12 องศา ในส่วนนี้จะนำเสนอโครงสร้างที่มีการจัดวางแบบที่เป็น Reciprocal กัน 5 คู่ คือ 65 องศา-18 องศา, 69 องศา-14 องศา, 71 องศา-12 องศา, 73 องศา-10 องศา และ 78 องศา-5 องศา โดยมีลักษณะตรงข้ามกันในแนวแกน x ซึ่งแสดงในภาพที่ 4.9 และแถบความถี่ผ่านของดัชนีการหักเหของแสงคิดลบ (NRI Bands) ได้แสดงอยู่ในตารางที่ 4.3

ไม่เพียงแต่การจัดวางโครงสร้างที่มีลักษณะเป็น Reciprocal กันของกลุ่ม 65 องศา-18 องศา, 69 องศา-14 องศา, 71 องศา-12 องศา, 73 องศา-10 องศา และ 78 องศา-5 องศา ยังพบว่าโครงสร้างในแถวเดียวกันของภาพที่ 4.9 นั้นยังมีคุณสมบัติที่ Reciprocal เช่นกัน และยังแสดงคุณสมบัติของไครออลิตีด้วย โดยยึดโครงสร้างในภาพที่ 4.9(c) และ 4.9(h) เป็นโครงสร้างหลักของแต่ละแถว โดยจะสังเกตได้ว่าโครงสร้างในฝั่งซ้ายและฝั่งขวาของโครงสร้างในภาพที่ 4.9(c) และ 4.9(h) นั้นมีลักษณะที่เหมือนภาพสะท้อนซึ่งกันและกัน ซึ่งนี่ก็ถือเป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่ช่วยสนับสนุนว่าโครงสร้างในกลุ่ม C_n ที่ได้ทำการออกแบบนั้นมีคุณสมบัติไอโซโทรปิกในหลายทิศทาง

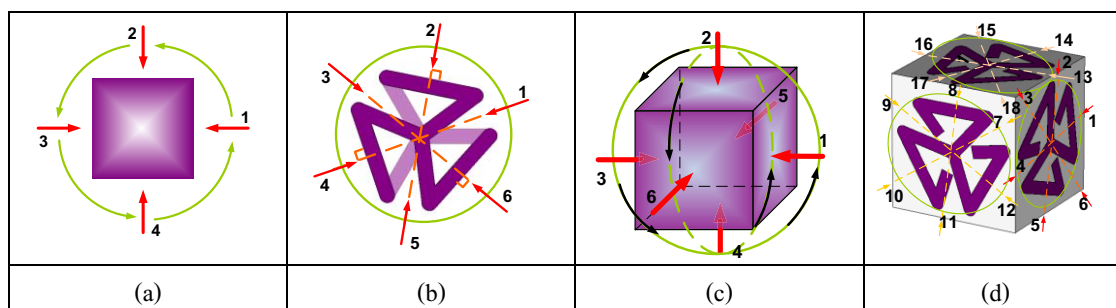


ภาพที่ 4.9 แสดงการจัดวางโครงสร้างที่มีการจัดวางแตกต่างกันของโครงสร้าง C_3 ที่มีลักษณะการจัดวางที่เป็นเรซิโปรคัลกัน (a) 65 องศา, (b) 69 องศา, (c) 71 องศา, (d) 73 องศา (e) 78 องศา, (f) 18 องศา, (g) 14 องศา, (h) 12 องศา, (i) 10 องศา และ (j) 5 องศา

ตารางที่ 4.3 แสดงช่วงความถี่ที่เกิดแถบผ่านของดัชนีหักเหติดลบของแสงของโครงสร้าง C_3 ในการจัดวางที่มุมต่างๆ

Angle (Degree)	Double Negative NRI Bands (where Loss Factor < 1)
65 and 18	13.81-14.62, 15.38-16.03
69 and 14	13.67-14.68, 15.52-16.09
71 and 12	13.9-14.76, 15.5-15.97
73 and 10	13.94-14.81, 15.52-16.09
78 and 5	13.9-14.93, 15.46-15.97

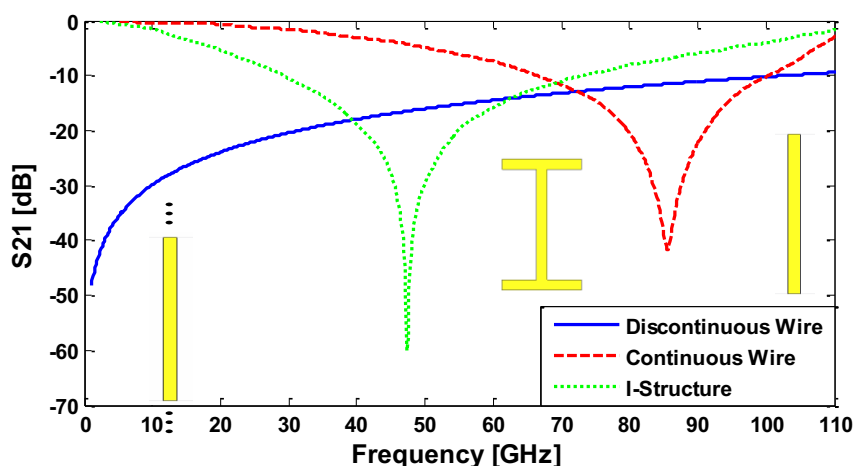
กลุ่มวิจัยหลายกลุ่ม [58, 78-79] ได้พยายามที่จะออกแบบโครงสร้างใน 2 มิติ และ 3 มิติ มิติที่มีคุณสมบัติไอโซทรอปิก โดยสามารถสรุปโครงสร้างที่กลุ่มนักวิจัยเหล่านั้นได้ทำการออกแบบให้มีคุณสมบัติไอโซทรอปิกได้ดังภาพที่ 4.10 (a และ c) แต่โครงสร้างดังกล่าวสามารถแสดงคุณสมบัติไอโซทรอปิกได้เพียง 4 ทิศทาง และ 6 ทิศทาง สำหรับใน 2 มิติ และ 3 มิติ ตามลำดับ แต่ในทางกลับกันโครงสร้างในกลุ่ม C_n ที่มีแกน n แกน จะสามารถทำให้เกิดลักษณะของไอโซทรอปิกได้ถึง $2n$ ทิศทางสำหรับ 2 มิติ และคาดว่าจะสามารถแสดงได้ $6n$ ทิศทางสำหรับ 3 มิติ ดังภาพที่ 4.10 (b และ d) ลูกศรที่ชี้จะแสดงถึงทิศทางของการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถทำให้เกิดผลลัพธ์ที่เหมือนกัน โครงสร้างใน 3 มิติของโครงสร้างในกลุ่ม C_n สามารถทำได้โดยนำเอาโครงสร้างใน 2 มิติมาจัดวางให้มีลักษณะเป็นเซลล์หน่วยที่มีลักษณะเป็นกล่องทรงสี่เหลี่ยม (Cubic Cell)



ภาพที่ 4.10 ลูกศรที่ชี้จะแสดงถึงทิศทางของการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังโครงสร้าง (a) ทัวไป 2 มิติ, (b) C_3 ใน 2 มิติ (c) ทัวไป 3 มิติ และ (d) C_3 ใน 3 มิติ ที่มีคุณสมบัติไอโซทรอปิกที่สามารถทำให้เกิดผลลัพธ์ที่เหมือนกัน

4.3 ค่าความจุไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีผลต่อตำแหน่งของค่ายังผลของพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Capacitance and Inductance Modification vs. Location of Effective Material Parameters)

ค่าความจุไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้านั้นมีบทบาทสำคัญต่อการออกแบบโครงสร้างของวัสดุเหนือธรรมชาติ การปรับเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าโครงสร้างสามารถที่จะกำหนดตำแหน่งของการเกิดการสั่นพ้อง (Resonance) ของค่ายังผลของพารามิเตอร์ต่างๆ [26, 33] ซึ่งค่ายังผลของพารามิเตอร์เหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดตำแหน่งของแถบความถี่ผ่านในการออกแบบโครงสร้างอีกทีหนึ่ง ดังจะเห็นได้จากการที่จะพยายามปรับช่วงของการเกิดดัชนีการหักเหของแสงติดลบของวัสดุเหนือธรรมชาติที่ประกอบด้วย SRR และ Copper Wire ทั้งนี้เนื่องจากว่า โดยปกติแล้วตำแหน่งที่เกิด $-\mu$ ของ SRR นั้นจะเกิดในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่าการเกิด $-\epsilon$ ของโครงสร้างของ Copper Wire มาก ดังนั้นเพื่อที่จะปรับให้การเกิด $-\mu$ และ $-\epsilon$ ได้ในช่วงความถี่เดียวกันจึงต้องพยายามที่จะทำให้ SRR เกิด $-\mu$ ในช่วงความถี่ที่สูงขึ้น และ $-\epsilon$ เกิดในช่วงที่ความถี่ต่ำลง ซึ่งจากการศึกษาที่พบว่าไม่เพียงแต่การปรับโครงสร้างของเส้นลวดที่มีความยาวอนันต์ (Continuous Copper Wire) ให้เป็นแบบที่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous) จะสามารถช่วยลดตำแหน่งของการเกิด $-\epsilon$ ให้ต่ำลงได้ แต่การเพิ่มแขนที่ปลายของ Copper Wire ให้มีลักษณะคล้ายกับรูปตัว I [26] ยังสามารถช่วยลดค่าความถี่พลาสมา (Plasma Frequency) ได้มากขึ้นอีก [24] ทั้งนี้เพราะการเพิ่มความยาวแขนก็คือการเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าซึ่งจะส่งผลไปถึงค่าของ ความถี่สั่นพ้องทางแม่เหล็ก (Magnetic Resonance) ในสมการที่ (3.8) นั่นเอง ภาพที่ 4.11 แสดงโดยโครงสร้าง Copper Wire มีขนาดความยาวเท่ากับ 2.5 mm หนา 0.1 mm จะพบว่าโครงสร้าง I-Shape ที่มีการเพิ่มแขนเข้ามาปิดส่วนบนและส่วนท้ายของโครงสร้างซึ่งยาว 1.5 mm นั้นจะเกิดแถบความถี่หยุดผ่าน (Stop Band) ในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่าในทั้งสองกรณี ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มแขนของตัว I เข้าไปเป็นการเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าจึงทำให้ค่าความถี่ที่เกิดการสั่นพ้องทางแม่เหล็กลดลง

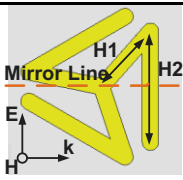
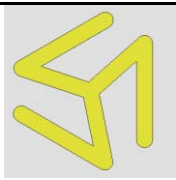
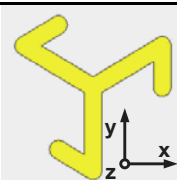


ภาพที่ 4.11 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของโครงสร้าง (a) Continuous Wire, (b) I-Shape และ (c) Discontinuous Wire

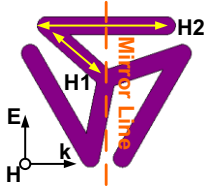
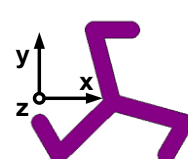
ดังจะเห็นได้ว่าค่าความจุไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้านั้นมีอิทธิพลต่อตำแหน่งของการเกิดการสั่นพ้องของค่ายังผลของพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งจะส่งผลไปถึงตำแหน่งของการเกิดค่าดัชนีการหักเหของแสงที่ติดลบอีกด้วย จากเหตุผลดังกล่าวการออกแบบแขนย่อย (H2) และแขนหลัก (H1) ของโครงสร้าง C_3 จึงมีผลต่อตำแหน่งของการเกิดการสั่นพ้องของ $-\mu$ และ $-\epsilon$ ให้เกิดขึ้นในช่วงความถี่เดียวกัน เนื่องจากว่าแขนทั้งสองนี้เป็นตัวที่ทำให้เกิดค่าความจุไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของโครงสร้าง

4.3.1 อัตราของความยาวแขน H2 ต่อ H1 (Structure Size: H2:H1 Ratio)

ภาพที่ 4.12 แสดงโครงสร้าง C_3 ที่มีอัตราความยาวของแขน H2:H1 ในขนาดที่แตกต่างกัน ในภาพที่ 4.12(a)–(e) แสดงการจัดวางโครงสร้างในทิศทาง k นั้นตั้งฉากกับ Mirror Line และในภาพที่ 4.12(f)–(j) แสดงการจัดวางโครงสร้างในทิศทาง k นั้นขนานกับ Mirror Line ในทั้งสองกรณีได้ทำการจำกัดความยาวของ H1 ให้คงที่ ดังนั้นขนาดของ H2 จึงเป็นตัวกำหนดค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง ค่า ความถี่สั่นพ้องทางแม่เหล็ก (Magnetic Resonance Frequency, ω_{m0}) ที่ได้จากการคำนวณหาจากสมการ (3.8) ของในแต่ละโครงสร้างได้แสดงอยู่ได้ในแต่ละโครงสร้าง

H2:H1= 1.50	H2:H1= 1.33	H2:H1= 1.00	H2:H1= 0.75	H2:H1= 0.50
				
17.288GHz	17.374GHz	20.831GHz	27.403GHz	45.092GHz
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)

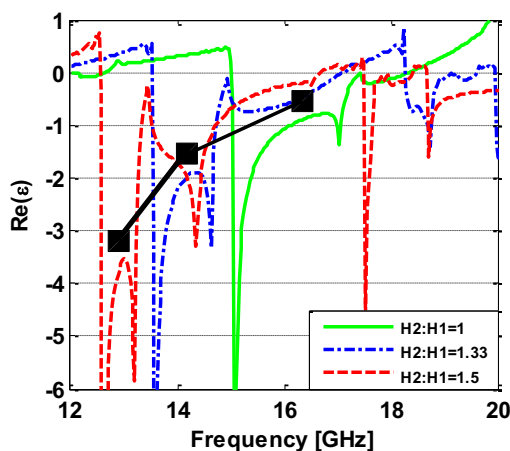
ภาพที่ 4.12 โครงสร้าง C_3 ที่มีอัตราความยาวของแขน H2:H1 ในขนาด H2:H1 เท่ากับ (a) 1.50 (b) 1.33, (c) 1.00, (d) 0.75 และ (e) 0.50 ในทิศทาง k ขนานกับ Mirror Line

H2:H1= 1.50	H2:H1= 1.33	H2:H1= 1.00	H2:H1= 0.75	H2:H1= 0.50
				
17.288GHz	17.374GHz	20.831GHz	27.403GHz	45.092GHz
(f)	(g)	(h)	(i)	(j)

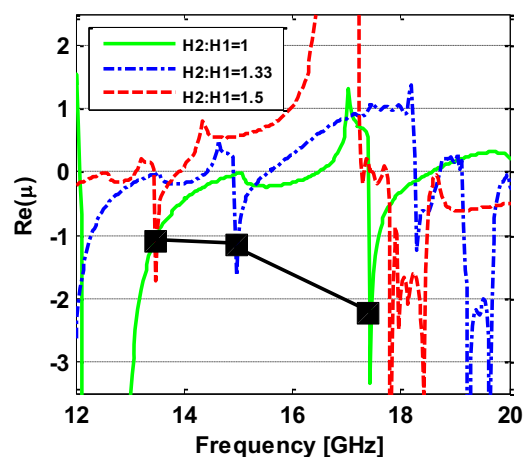
ภาพที่ 4.12 โครงสร้าง C_3 ที่มีอัตราความยาวของแขน H2:H1 ในขนาด H2:H1 เท่ากับ (f) 1.50 (g) 1.33, (h) 1.00, (i) 0.75 และ (j) 0.50 ในทิศทางที่ $\mathbf{k}$ ตั้งฉากกับ Mirror Line (ต่อ)

ในภาพที่ 4.12 จะสามารถสังเกตได้ว่าในโครงสร้างที่มีอัตราส่วนของ H2:H1 ต่ำๆนั้นจะทำให้ค่า ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าน้อยจึงทำให้ค่าความถี่สั่นพ้องทางแม่เหล็กนั้นมีค่าสูง และยังพบว่าในกรณีของ H2:H1 มีค่าเท่ากับ 0.75 และ 0.5 นั้นไม่สามารถที่จะนำมาพิจารณาเนื่องจากว่าโครงสร้างทั้งสองนี้อยู่นอกเหนือจากข้อกำหนดของขนาดโครงสร้างเซลล์หน่วยของวัสดุเนื้อธรรมชาติ ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 ซึ่งทำให้ไม่สามารถแสดงคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกัน การที่ได้นำเสนอการปรับอัตราส่วนของ H2:H1 ในโครงสร้างที่ได้มีการจัดวางแตกต่างกันและไม่ได้เป็นเรขาคณิตสองแบบนั้นเนื่องจากว่าต้องการที่จะย้ายจากการศึกษาในส่วนที่ 2 ว่าตำแหน่งของการจัดวางโครงสร้างนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการทำปฏิกิริยาของโครงสร้างกับทิศทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งเข้า ดังจะสังเกตได้จาก ภาพที่ 4.13 และ 4.14 นั้นมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนของลักษณะและตำแหน่งของการเกิด $-\mu$ และ $-\epsilon$

ในภาพที่ 4.13 และ 4.14 แสดงค่าในส่วนจำนวนจริงของค่ายังผลของพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ϵ และ μ ของโครงสร้าง C_3 ที่มีอัตราส่วนของแขน H2:H1 ไม่เท่ากัน ในทิศทางที่ $\mathbf{k}$ ขนานและตั้งฉากกับ Mirror Line ตามลำดับ

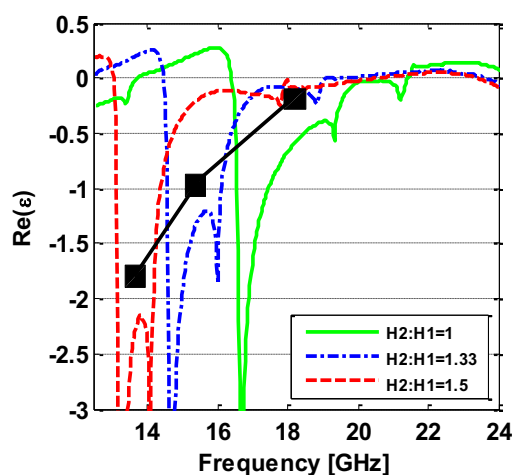


(a)

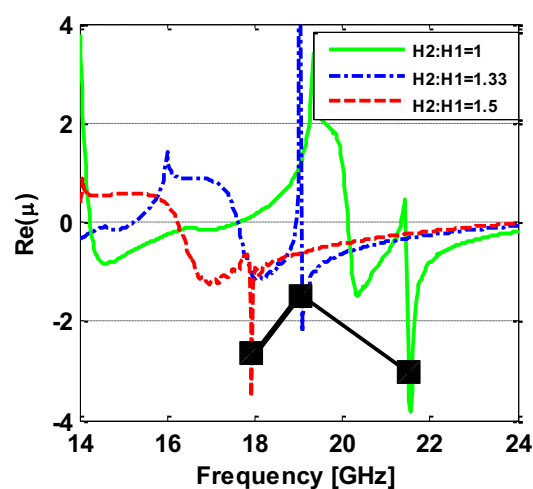


(b)

ภาพที่ 4.13 แสดงค่ายังผลของพารามิเตอร์ของโครงสร้าง C_3 เมื่ออัตราส่วนของ H2:H1 มีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่ k ขนานกับ Mirror Line (a) ส่วนจำนวนจริงของ ϵ และ (b) ส่วนจำนวนจริงของ μ



(a)



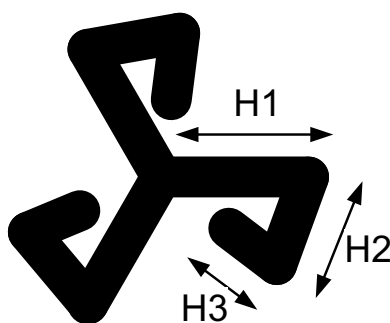
(b)

ภาพที่ 4.14 แสดงค่ายังผลของพารามิเตอร์ของโครงสร้าง C_3 เมื่ออัตราส่วนของ H2:H1 มีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่ k ตั้งฉากกับ Mirror Line (a) ส่วนจำนวนจริงของ ϵ และ (b) ส่วนจำนวนจริงของ μ

พบว่าในทั้งสองกรณีตำแหน่งของการเกิด $-\epsilon$ และ $-\mu$ นั้นเกิดขึ้นในช่วงความถี่ที่ต่ำลงมาเมื่ออัตราส่วนของ H2:H1 เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตแนวโน้มได้จากสีเหลี่ยมสีดำเล็กๆที่เชื่อมต่อด้วยเส้นตรงสีดำ ซึ่งเป็นการสนับสนุนแนวความคิดเกี่ยวกับการปรับเปลี่ยนค่าค่าความจุไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าเพื่อช่วยในการออกแบบโครงสร้าง

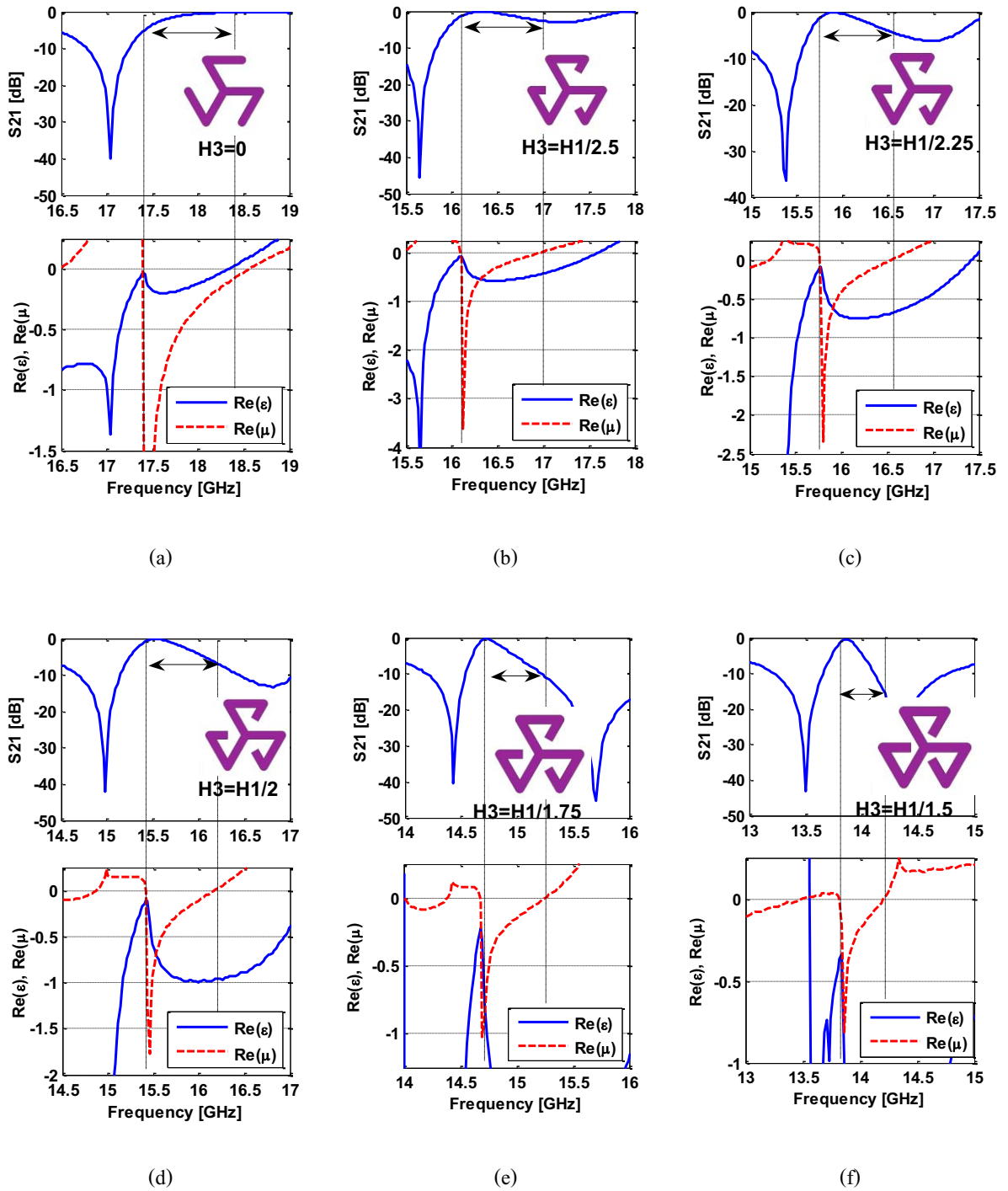
4.3.2 เมื่อใส่แขนเสริม (Extra Arm: H3)

อีกวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยในการออกแบบโครงสร้างให้มีลักษณะที่ดีขึ้นคือการเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าเพื่อที่จะลดตำแหน่งของการเกิดความถี่สั้นป้องทางแม่เหล็กโดยการเพิ่มแขนเสริม (H3) ดังแสดงในภาพที่ 4.14 การเพิ่มแขนพิเศษนี้จะส่งผลต่อความถี่สั้นป้องทางแม่เหล็กโดยการเพิ่มแขน H3 นี้จะเป็นส่วนที่ช่วยเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า เนื่องจากได้มีการเพิ่มความยาวของส่วนที่ซ้อนทับกันของแขนที่ทำให้เกิดค่าความจุไฟฟ้า (สมการที่ (3.10)) และยังเป็น การเพิ่มความยาวของส่วนที่เป็นค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (สมการที่ (3.9)) ด้วย เมื่อค่าความจุไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าสูงขึ้นจะสามารถทำให้ตำแหน่งของการเกิด NRI ต่ำลงด้วย ซึ่งเป็นผลให้เราได้โครงสร้างที่สามารถทำงานได้ในช่วงความถี่ต่ำแต่ขนาดของ Unit Cell เท่าเดิม (เส้นผ่านศูนย์กลาง, a) ซึ่งวิธีการนี้เป็นการช่วยให้โครงสร้างของวัสดุเหนือธรรมชาติที่ได้ออกแบบยังอยู่ภายใต้ขอบเขตที่ว่าเซลล์หน่วย (Unit Cell) ของโครงสร้างนั้นจะต้องมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นในช่วงที่ทำการ (Operating Wavelength) $a \ll \lambda$, โดย λ คือขนาดของความยาวคลื่นในช่วงทำการ



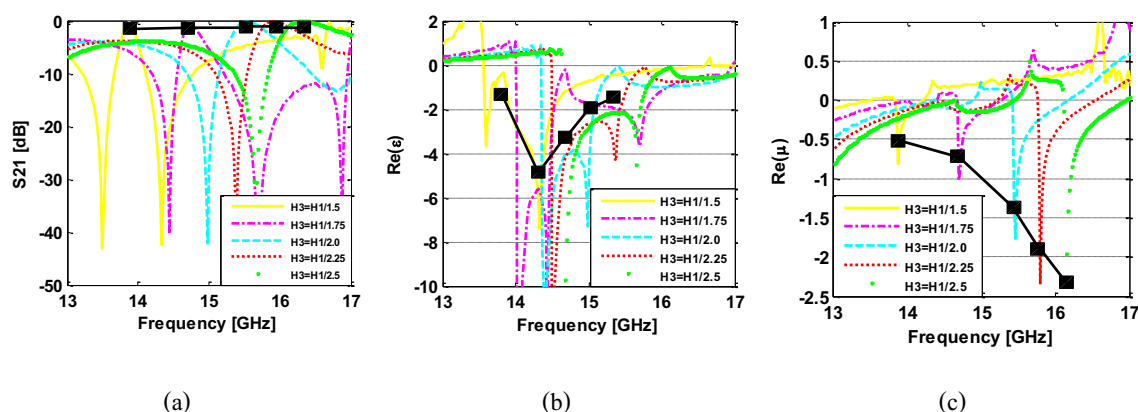
ภาพที่ 4.15 แสดงองค์ประกอบของโครงสร้าง C_3 ซึ่งประกอบด้วยแขนหลัก H1 แขนย่อย H2 และแขนเสริม H3

ในภาพที่ 4.15 แสดงโครงสร้าง C_3 ที่มีแขน H3 ในความยาวที่แตกต่างกัน ซึ่งมีอยู่ 6 ขนาด ตั้งแต่ 0 เท่าถึง 2:3 เท่าของแขน H1 ความยาวของแขน H3 นั้นเป็นสัดส่วนกับความยาวของ H1 โดยเราได้ทำการจำกัดขนาดของ H1 และ H2 ไว้ให้มีขนาดคงที่ ผลของการจำลองผลการทดลองของการเพิ่มแขน H3 ได้แสดงอยู่ในภาพที่ 4.16 ซึ่งประกอบด้วย S_{21} ส่วนจำนวนจริงของดัชนีการหักเหของแสง ϵ , μ และ อัตราการสูญเสียของสัญญาณ (Loss Factor)



ภาพที่ 4.16. แสดงโครงสร้าง C_3 ที่มีแขน H_3 เมื่อ H_3 มีขนาดเท่ากับ (a) 0, (b) $H_1/2.5$, (c) $H_1/2.25$, (d) $H_1/2$, (e) $H_1/1.75$ และ (f) $H_1/1.5$ พร้อมกับค่าพารามิเตอร์ S_{21} และส่วนจำนวนจริงของดัชนีการหักเหของแสง, ϵ และ μ

จากการจำลองผลการทดลองของโครงสร้าง C_3 ที่มีแขน H_3 เมื่อ H_3 มีขนาดเท่ากับ 0, $H_1:2.5$, $H_1:2.25$, $H_1:2$, $H_1:1.75$ และ $H_1:1.5$ ที่แสดงในภาพที่ 4.15 พบว่าตำแหน่งของการเกิด $-\mathcal{E}$ และ $-\mu$ ที่คาบเกี่ยวกันนั้นอยู่ในช่วงความถี่ที่ต่ำลง ค่าความจุไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากแขน H_3 นั้นทำให้ตำแหน่งของการเกิด Double Negative NRI เกิดในช่วงความถี่ที่ต่ำลง ซึ่งสามารถพิจารณาเปรียบเทียบได้ในภาพที่ 4.17 โดยพบว่าในกรณีที่มี $H_3 = H_1:1.5$ นั้นเกิด Double Negative NRI ในช่วงที่ความถี่ต่ำสุด

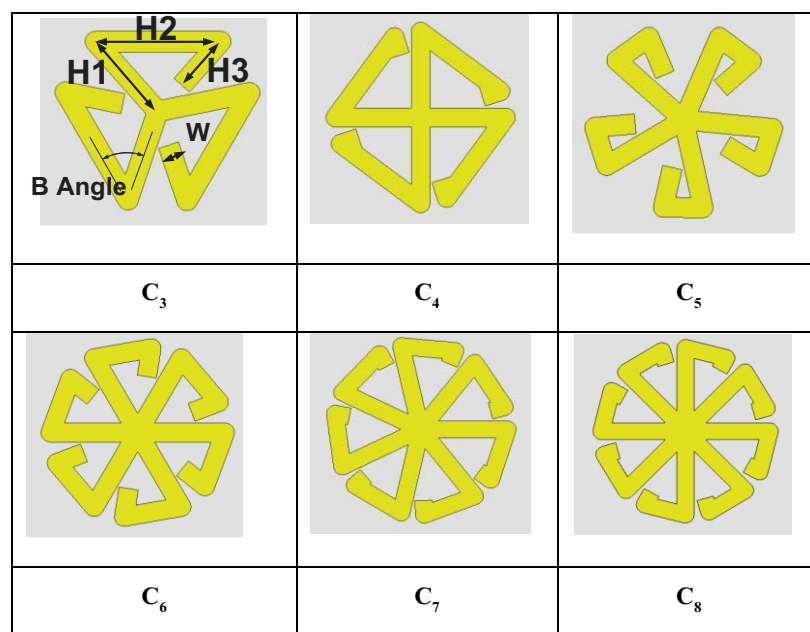


ภาพที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบของ (a) ค่าพารามิเตอร์ S_{21} (b) ส่วนจำนวนจริงของ $\mathcal{E}$ และ (c) ส่วนจำนวนจริงของ μ ของโครงสร้าง C_3 ที่มีการเพิ่มแขน H_3 ที่ขนาดต่าง ๆ กัน

จากการทดลองในส่วนที่ 4.3 นี้เป็นการสนับสนุนว่าค่าความจุไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้านั้นมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อการออกแบบโครงสร้างของวัสดุเหนือธรรมชาติได้เป็นอย่างดี ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการคาดการณ์ตำแหน่งของการเกิด Double Negative NRI ของโครงสร้าง

4.4 โครงสร้างอื่นๆในกลุ่ม C_n (Other Optimization of C_n Structures)

จากปัจจัยข้างต้นที่กล่าวมาไม่ว่าจะเป็นการปรับเปลี่ยนอัตราความยาวของ $H_2:H_1$, มุมของการวางโครงสร้าง และการเพิ่มแขนเสริม H_3 นั้นส่งผลต่อลักษณะและคุณสมบัติของการส่งผ่านของสัญญาณทั้งสิ้น ดังนั้นหลักการในการปรับแต่งโครงสร้างภายในวิทยานิพนธ์เล่มนี้เราจะยึดหลักการดังกล่าวในการปรับแต่งโครงสร้างให้มีคุณสมบัติ ไครด ไอโซทรอปิก และมีดัชนีการหักเหของแสงที่ติดลบ ซึ่งเราได้ทำการออกแบบให้ทุกโครงสร้างทำงานอยู่ในช่วงความถี่ 14 GHz ในส่วนนี้เราได้ทำการนำเสนอโครงสร้าง C_3 - C_8 ที่ได้ทำการปรับแต่งจากหลักการข้างต้น โดยลักษณะและขนาดของโครงสร้างได้แสดงอยู่ในภาพที่ 4.18 และ ตารางที่ 4.4

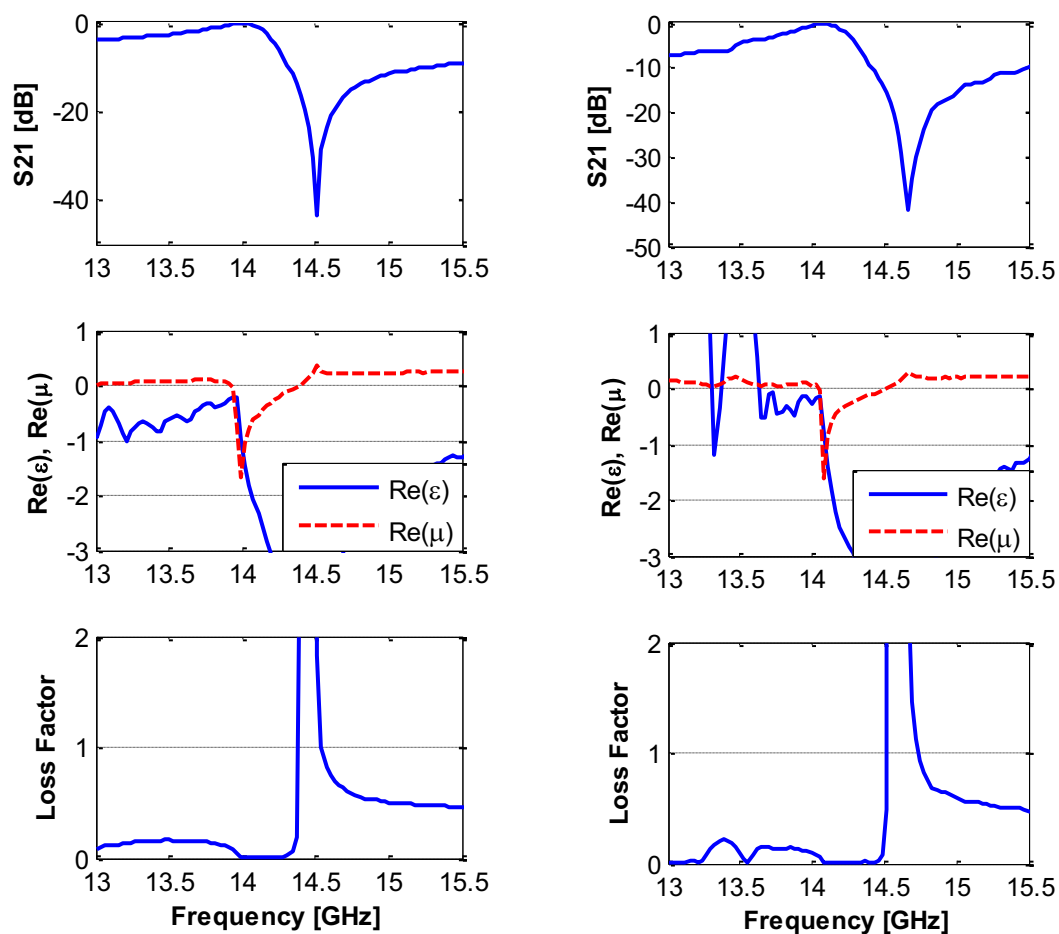


ภาพที่ 4.18 แสดงโครงสร้างของในกลุ่มของ C_3 - C_8 ที่ได้รับการออกแบบ

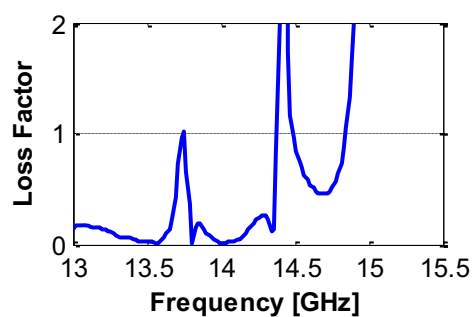
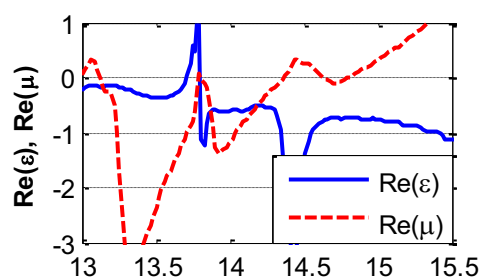
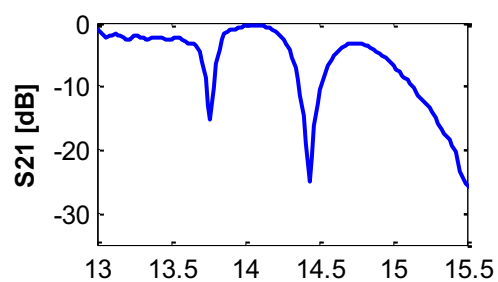
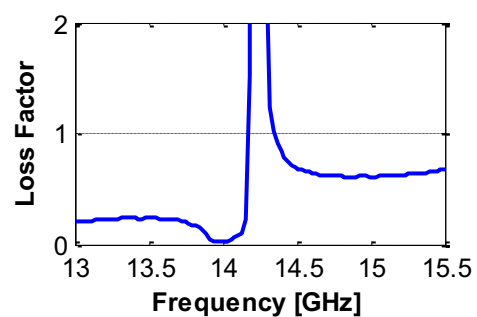
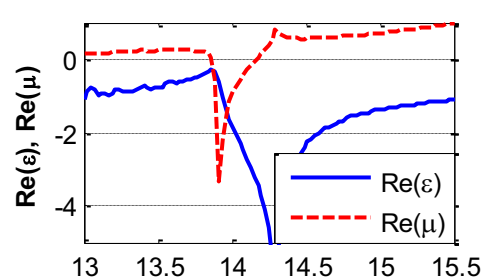
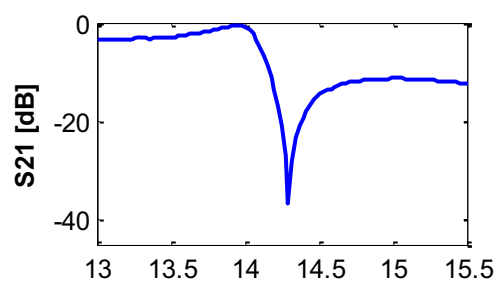
ตารางที่ 4.4 แสดงขนาดของพารามิเตอร์ต่างๆของโครงสร้างในกลุ่ม C_3 - C_8 ที่ได้รับการออกแบบ

Structure	Structure Parameter				
	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	W (mm)	B Angle (Degree)
C_3	3.3	4.4	2.1	0.74	48.5
C_4	3.8	4.5	0.85	0.85	53.5
C_5	3.6	1.6	1.6	0.8	77
C_6	2.6	1.7	0.87	0.58	70
C_7	2.9	1.8	0.475	0.57	72
C_8	3.6	1.8	0.6	0.72	76

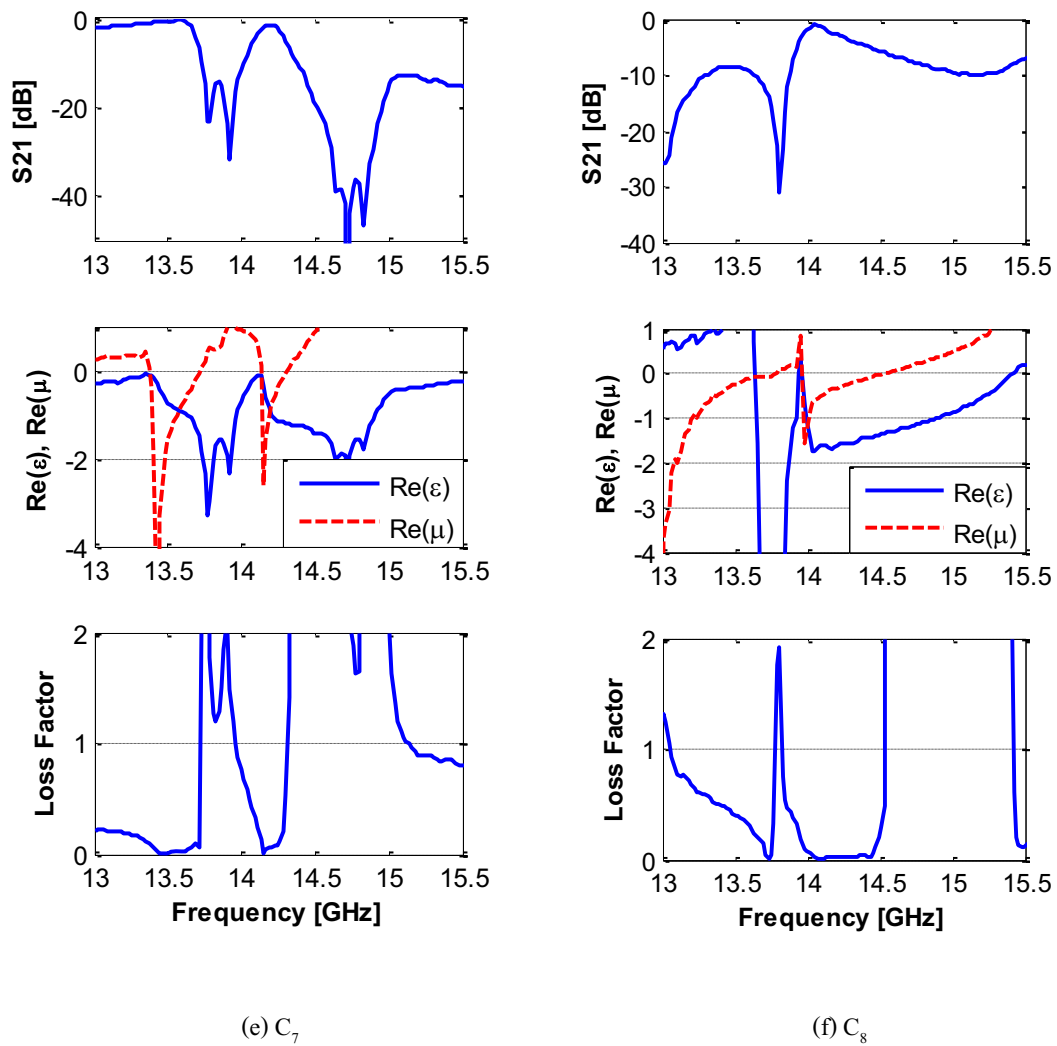
ผลของการจำลองผลการทดลองของโครงสร้าง C_3 - C_8 ได้แสดงอยู่ในภาพที่ 4.19 ซึ่งประกอบด้วย ค่าพารามิเตอร์ S_{21} , ส่วนจำนวนจริงของดัชนีการหักเหของแสง, ϵ , μ และ อัตราการสูญเสียของสัญญาณ (Loss Factor)

(a) C_3 (b) C_4

ภาพที่ 4.19 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของสัญญาณ (S_{21}), ส่วนจำนวนจริงของค่า ϵ และ μ และอัตราการสูญเสียของสัญญาณของโครงสร้าง (a) C_3 และ (b) C_4

(c) C_5 (d) C_6

ภาพที่ 4.19 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของสัญญาณ (S_{21}), ส่วนจำนวนจริงของค่า ϵ และ μ และอัตราการสูญเสียของสัญญาณของโครงสร้าง (c) C_5 และ (d) C_6 (ต่อ)



ภาพที่ 4.19 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของสัญญาณ (S_{21}), ส่วนจำนวนจริงของค่า ϵ และ μ และอัตราการสูญเสียของสัญญาณของโครงสร้าง (e) C_7 และ (f) C_8 (ต่อ)

ตารางที่ 4.5 แสดงช่วงความถี่ที่เกิดแถบผ่านของดัชนีหักเหของแสงติดลบของโครงสร้าง C_3 - C_8

C_n Structure	Double Negative NRI Bands (where Loss Factor < 1)
C_3	13.82-14.37
C_4	13.96-14.51
C_5	13.79-14.38
C_6	13.89-14.18
C_7	14.13-14.32
C_8	13.92-14.53

จากผลการออกแบบโครงสร้าง C_3 - C_8 ที่ได้นำเสนอในภาพที่ 4.19 นั้น จะพบว่าโครงสร้างแต่ละโครงสร้างนั้นมีลักษณะและคุณสมบัติของการส่งผ่านของสัญญาณรวมถึงค่ายังผลของพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากแต่ละโครงสร้างมีจำนวนแขนต่างกัน ผลของจำนวนแขนเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อลักษณะและคุณสมบัติของการส่งผ่านของสัญญาณ แม้ว่าทุกโครงสร้างจะมีสมการวงจรรวมที่เหมือนกันดังในสมการ (3.8) แต่เมื่อจำนวนแขนมากขึ้นจะส่งผลต่อความยาวของ H1, H2 และ H3 เนื่องจากว่ามีระยะห่างระหว่างแขนลดลง ส่งผลถึงค่าความถี่สั่นพ้องทางแม่เหล็ก (Magnetic Resonance) และจากสมมติฐาน เราคาดว่า การที่มีแขนเพิ่มมากขึ้นจะทำให้แขนใกล้กันมากขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อการ เชื่อมร่วม (Coupling) กันระหว่างแขน ซึ่งปัจจัยนี้ก็ส่งผลถึงลักษณะและคุณสมบัติของการส่งผ่านของสัญญาณเช่นกัน ดังจะเห็นได้จากความหลากหลายของลักษณะและคุณสมบัติของการส่งผ่านของสัญญาณของในแต่ละโครงสร้าง แต่สิ่งหนึ่ง ที่เหมือนกันก็คือทุกโครงสร้างต่างมีคุณสมบัติไครอล ไอโซโทรปิก อีกทั้งยังสามารถสังเกตได้จากตารางที่ 4.5 ว่าในช่วงความถี่ที่เกิด Double Negative NRI ของทุกๆ โครงสร้างนั้นเกิดในช่วงที่มีอัตราการสูญเสียของสัญญาณที่ต่ำมากทั้งสิ้น ซึ่งเป็นผลดีและทำให้มีหลายทางเลือกมากขึ้นต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ

ดังจะเห็นได้ว่าทุกปัจจัยของโครงสร้างนั้นล้วนส่งผลต่อลักษณะและคุณสมบัติของการส่งผ่านของสัญญาณของโครงสร้าง ดังนั้นในการออกแบบโครงสร้างที่ได้นั้นจะต้องคำนึงถึงส่วนต่างๆของโครงสร้างเป็นอย่างดี ไม่ว่าจะเป็น อัตราส่วนของ H2:H1 การจัดวางโครงสร้าง และการเพิ่มแขนเสริม H3 แต่ยังเป็นเพียงแค่ปัจจัยเพียงกลุ่มเดียวเท่านั้นที่ได้เลือกมานำเสนอเกี่ยวกับการศึกษาลักษณะทางกายภาพที่ส่งผลต่อลักษณะและคุณสมบัติของการส่งผ่านของสัญญาณ ยังมีองค์ประกอบปลีกย่อย อื่นอีกที่ส่งผลต่อลักษณะและคุณสมบัติของการส่งผ่านของสัญญาณ เช่น การจัดวางโครงสร้างย่อยซึ่งจะส่งผลต่อลักษณะและคุณสมบัติของการส่งผ่านของสัญญาณ เนื่องจากการเกิดการเชื่อมร่วมกันระหว่างโครงสร้างที่อยู่ใกล้เคียงกัน ระยะห่างของแต่ละเซลล์หน่วย (Unit Cell) วัสดุที่นำมาใช้ในการทำโครงสร้าง หรือแม้แต่วัสดุที่ใช้ในการเป็นบอร์ดเพื่อที่จะพิมพ์โครงสร้างลงไป (Board Substrate) และปัจจัยอื่นๆอีกซึ่งจะได้ทำการศึกษาในโอกาสต่อไป

4.5 วิเคราะห์ผลการศึกษาและการออกแบบ

จากการศึกษาผลการปรับแต่งโครงสร้างในรูปแบบต่างๆของโครงสร้างในกลุ่ม C_3 แล้วทำการจำลองผลการทดลองด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio® ซึ่งใช้หลักการพื้นฐานจากวิธีผลต่างสลับเนื่องเชิงเวลา (Finite-Difference Time-Domain, FDTD) และวิเคราะห์ผลประกอบกับค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ϵ และ μ ค่าดัชนีการหักเหของแสง (n) รวมถึงค่าอัตราส่วนของการสูญเสียสัญญาณ (Loss Factor) ที่ได้จากการคำนวณจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและสะท้อนของสัญญาณที่ได้จากการจำลองผลการทดลอง สามารถที่จะสรุปออกมาได้ดังนี้

4.5.1 โครงสร้าง C_3 ที่มีลักษณะแขน H2 แบบตรงนั้นจะให้ผลของลักษณะและคุณสมบัติของการส่งผ่านและสะท้อนที่คล้ายกับโครงสร้าง C_3 ที่มีลักษณะแขน H2 แบบโค้ง แต่จะมีการขยับขึ้นไปเกิดในช่วงที่มีความถี่สูงกว่าเล็กน้อยทั้งนี้เนื่องจากว่ามีพื้นที่มากกว่าในพื้นที่ปิดล้อมจากแขน H1 และ H2 ดังนั้นจึงส่งผลให้มีค่า

ความจุไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่สูงกว่าในโครงสร้าง C_3 ที่มีลักษณะแขน H2 แบบโค้ง ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อช่วงที่เกิดความถี่สั้นพ้องทางแม่เหล็กของโครงสร้าง

4.5.2 จากการทดลองจัดวางโครงสร้าง C_3 ในมุมที่แตกต่างกันจาก 0 องศา ถึง 120 องศา พบว่าโครงสร้างในกลุ่มที่มีการจัดวางที่มุม 0 องศา 83 องศา และ 120 องศา นั้นให้ลักษณะและคุณสมบัติของการการส่งผ่านและสะท้อนที่เหมือนกัน ทั้งนี้เนื่องจากว่าโครงสร้างทั้งสามแบบนี้มีการจัดวางที่เป็น เรซิโปรคอล (Reciprocal) กัน โดยจะมีแขน H1 ที่ขนานกับ k เหมือนกัน

4.5.3 จากโครงสร้าง C_3 ที่ได้ทำการออกแบบในการทดลองที่ 4.2.1 และผ่านการวิเคราะห์ผลของ Double Negative NRI, อัตราการสูญเสียของพลังงาน และลักษณะของค่ายังผลของพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า พบว่าโครงสร้างที่มีการจัดวางที่ 12 องศา ที่มีเส้นภาพสะท้อน (Mirror Line) ตั้งฉากกับ k นั้นให้ผลที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับอีกทั้ง 5 กรณี คือ 0 องศา 42 องศา 83 องศา 95 องศา และ 120 องศา

4.5.4 ในการทดลองในส่วนที่ 4.2.3 เป็นการตรวจสอบคุณสมบัติไอโซทรอปิกของโครงสร้าง C_3 โดยได้นำโครงสร้าง C_3 ที่มีการจัดวางที่มีลักษณะเป็นเรซิโปรคอล (Reciprocal) กันจากการทดลองในส่วนที่ 4.2.1 และ 4.2.2 มาทำการตรวจสอบอีกครั้ง โดยผลปรากฏว่าโครงสร้าง C_3 ที่มีการจัดวางตัวที่มีลักษณะเป็นเรซิโปรคอลกันในหลายรูปแบบนั้นให้ผลของลักษณะการส่งผ่านและสะท้อนของสัญญาณและค่ายังผลของพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ตลอดจนค่าดัชนีการหักเหของแสง (n) ที่เหมือนกัน แต่ทั้งนี้ก็มีโครงสร้างที่จัดวางตัวเป็นแบบเรซิโปรคอลกันที่ให้ผลของค่าดัชนีการหักเหของแสงออกมาในทิศทางตรงกันข้ามกัน อย่างเช่นในกรณีของกลุ่ม 14 องศา และ 10 องศา และคู่ของ 69 องศา และ 73 องศา ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของโครอลลิติดีจึงจะสามารถสังเกตได้จากว่าโครงสร้างใน 2 คู่ดังกล่าวมีการหมุนไปในทิศที่ตรงข้ามกันของเส้นภาพสะท้อน

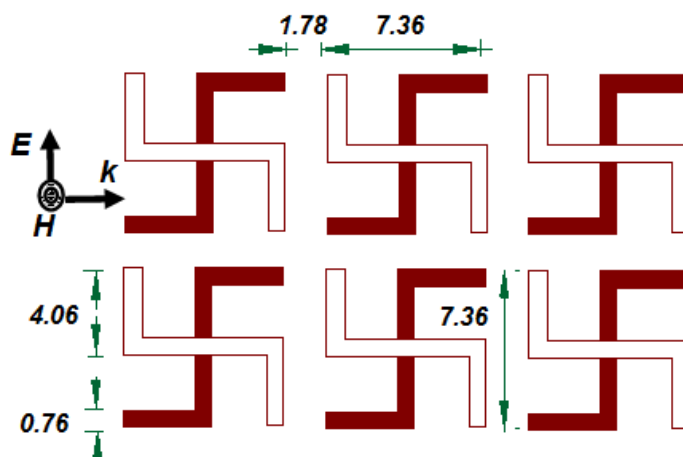
4.5.5 จากการทดลองในทุกส่วนเป็นการสนับสนุนได้อย่างดีว่าโครงสร้าง C_3 นั้นมีคุณสมบัติไอโซทรอปิก ซึ่งพบว่ามีอยู่ถึง 6 ทิศทางที่สามารถให้ผลลัพธ์ออกมาเหมือนกันเมื่อมีการส่งคลื่นสัญญาณเข้าในทิศทางที่แตกต่างกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงโครงสร้าง C_n ตัวอื่นๆด้วยแล้วจะพบว่า ในโครงสร้างในกลุ่ม C_n นั้นสามารถแสดงคุณสมบัติไอโซทรอปิกได้ถึง $2n$ ทิศทาง ในขณะที่โครงสร้าง ไอโซทรอปิกของวัสดุเนื้อธรรมชาติจากกลุ่มวิจัยอื่นๆนั้นมีเพียง 4 ทิศทางที่สามารถสามารถแสดงคุณสมบัติไอโซทรอปิกได้ใน 2 มิติ และหากพิจารณาโครงสร้างใน 3 มิติแล้วจะพบว่าโครงสร้างในกลุ่ม C_n นั้นมีทั้งหมดถึง $6n$ ทิศทางที่สามารถสามารถแสดงคุณสมบัติไอโซทรอปิก ในขณะที่โครงสร้างไอโซทรอปิกของวัสดุเนื้อธรรมชาติจากกลุ่มวิจัยอื่นๆ นั้นมีเพียง 6 ทิศทาง

4.5.6 ผลของค่าความจุไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Capacitance และ Inductance) เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อตำแหน่งของการเกิด Double Negative NRI

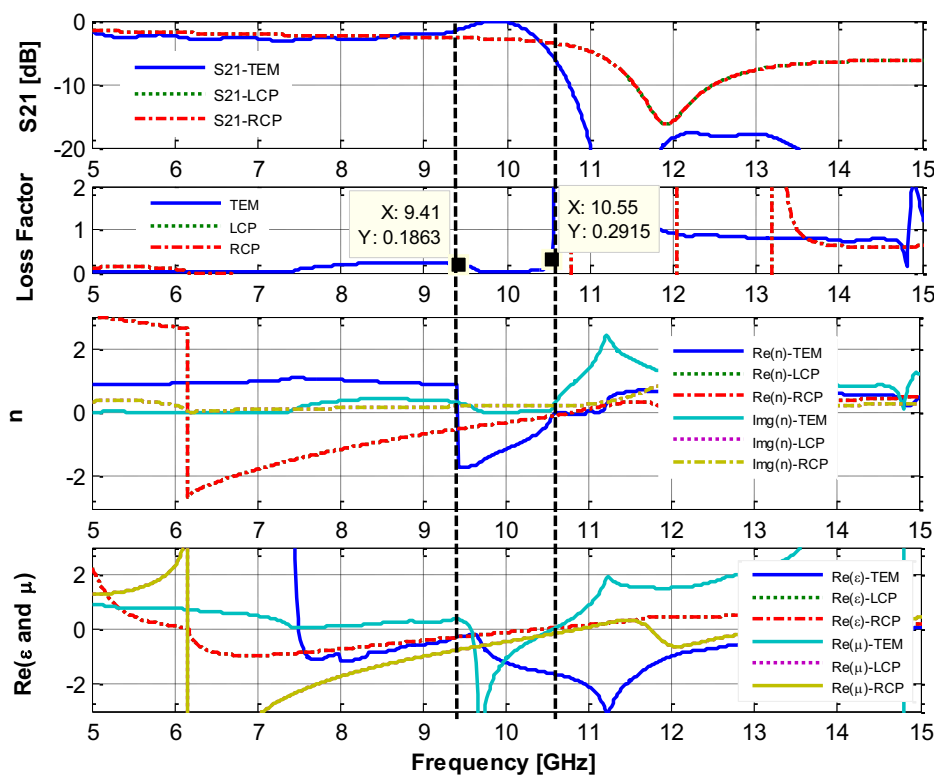
4.5.7 จากการเพิ่มแขนเสริม H3 นั้นช่วยในการเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าให้กับโครงสร้างได้ทำให้สามารถลดตำแหน่งของการเกิด Double Negative NRI ลงมาในช่วงความถี่ต่ำได้โดยไม่ต้องทำการเพิ่มขนาดของโครงสร้าง ซึ่งยังคงทำให้ขนาดของเซลล์หน่วย (Unit Cell) ของโครงสร้าง นั้นมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นในช่วงที่ทำการ ซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดของโครงสร้างของวัสดุเนื้อธรรมชาติเพื่อที่จะสามารถแสดงความเป็นเนื้อเดียวกันได้เมื่อรวมตัวกันเป็นวัสดุมหัพรรณ

4.6 การสร้างและผลการทดลองวัสดุโครงสร้างต้นแบบ

ได้สร้างวัสดุโครงสร้างต้นแบบโดยเลือกวัสดุโครงสร้าง C4 ที่มีการทำงานในช่วงความถี่ไมโครเวฟ ภาพที่ 4.20 แสดงโครงสร้างที่ออกแบบดังกล่าว ผลการประมวลผลทางคอมพิวเตอร์แสดงในภาพที่ 4.21 ซึ่งค่าดัชนีการหักเหติดลบในช่วงความถี่ที่ 9.41-10.55 GHz



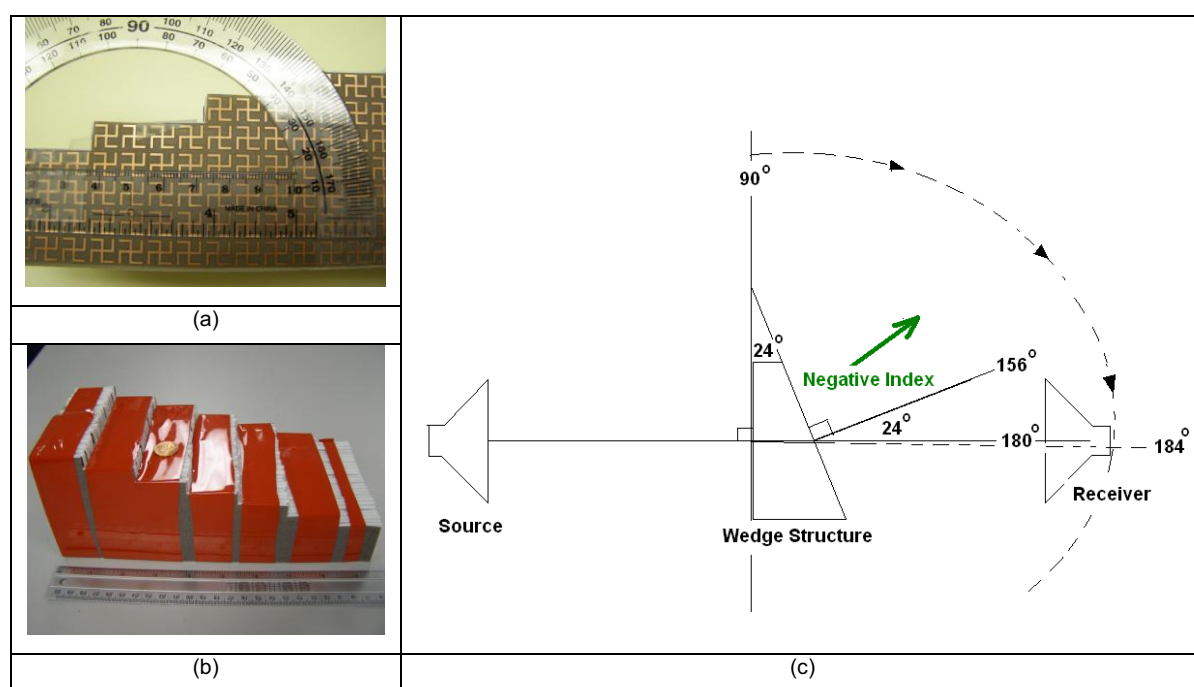
ภาพที่ 4.20 โครงสร้าง C4 ที่แสดงขนาดและทิศทางสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก และการเคลื่อนที่ของคลื่น



ภาพที่ 4.21 ผลการประมวลผลทางคอมพิวเตอร์ (ค่าพารามิเตอร์ทางวัสดุ) ของโครงสร้าง C4 ในภาพที่ 4.20

วัสดุโครงสร้าง C4 ถูกสร้างบนแผ่น Printed circuit board (PCB) ประเภท Rogers 5880 ที่มีทองแดงขนาด 1oz เคลือบหนึ่งด้าน แผ่น PCB มีขนาด 457.20mm x 304.80mm ค่า Permittivity ของแผ่น Substrate คือ 2.2 และมี Loss tangent เท่ากับ 0.0009 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมาก แผ่น PCB ที่ได้สร้างโครงสร้าง C4 เรียบร้อยแล้วจะถูกจะมาสร้างเป็นโครงสร้าง Wedge ที่มีมุมเท่ากับ 24 องศา มีสัดส่วนโครงสร้างขึ้นบันไดคือ 4 โครงสร้าง (ฐาน) ต่อ 1 โครงสร้าง (สูง) ในระหว่างแผ่น PCB จะสอดวัสดุ ECCOSTOCK®PP (PP4) ซึ่งมีความหนาเท่ากับ 3.18mm วัสดุ ECCOSTOCK®PP สร้างจาก Hydrocarbon resin foam เป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูงมีลักษณะคล้ายโฟมและมีคุณสมบัติคล้ายอากาศ มีค่า Permittivity และ Loss tangent เท่ากับ 1.03 และ 0.0001 ตามลำดับ

โครงสร้าง Wedge มุม 24 องศา ที่ได้ประกอบรวมแผ่น PCB (30 แผ่น) และ ECCOSTOCK®PP มีขนาด 250.83 mm x 88.90mm x 84.20mm มีจำนวนโครงสร้างในแนวความสูงและความกว้างจำนวน 28 และ 10 ตามลำดับ โครงสร้าง Wedge ดังกล่าวถูกหุ้มด้วยแผ่นพลาสติก ชนิด Top Flite Monokote®, ซึ่งมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับอากาศ ภาพที่ 4.22 แสดงรูปถ่ายโครงสร้าง Wedge และชุดจำลองการออกแบบการวัดผลการทดลองเพื่อใช้วัดค่าดัชนีการหักเหของแสงที่ติดลบ

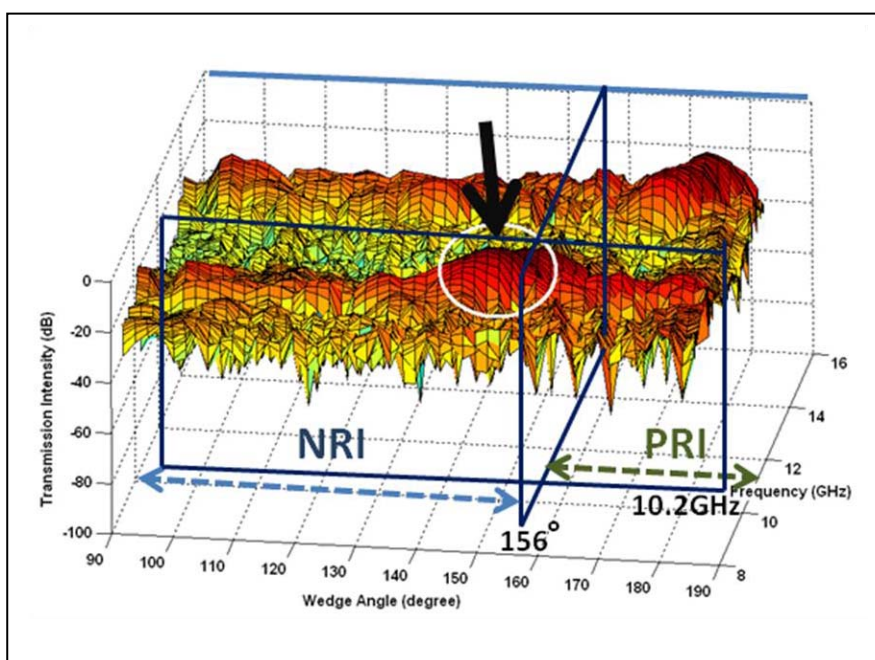


ภาพที่ 4.22 (a-b) ภาพถ่ายโครงสร้าง Wedge มุม 24 องศา และ (c) ชุดจำลองการวัดค่าดัชนีการหักเหของแสงที่ติดลบ

สายอากาศประเภท Horn ทั้งตัวรับและตัวส่งมีขนาดเส้นทแยงมุมฐานเท่ากับ 20cm x 20cm ซึ่งสร้าง 3dB beam width ที่ 14 องศา มีขนาดเท่ากับ 0.91m ซึ่งมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับความกว้างของ Wedge ทำให้คลื่น Input มีค่าที่เหมาะสม ประมาณคลื่นระนาบ ระยะระหว่าง Horn ถึงหน้าตัดของโครงสร้าง Wedge คือ 3.73m ในขณะที่ระยะจากหน้าตัดของโครงสร้าง Wedge (จุดเดิม) ถึง Horn ตัวรับคือ 2.58m. โดยที่ Horn ตัวรับเริ่มวัด

จากที่ 90 องศา ถึง 184 องศา ดังแสดงที่ภาพที่ 4.22 (C) Network Analyzer รุ่น HP 8530 เป็นตัวเก็บข้อมูลระหว่างการวัด

ภาพที่ 4.23 แสดงช่วงดัชนีการหักเห่กลับในช่วงความถี่ที่ 10.0-10.5 GHz ที่มีค่าการส่งที่เข้าใกล้ 0 dB เส้น 156 องศา คือมุมที่ตั้งฉากกับคลื่นที่เคลื่อนที่ออกจากพื้นผิวของโครงสร้าง Wedge และเส้น 10.2 GHz ถูกใช้เป็นเส้นอ้างอิงที่ใช้บ่งบอกพฤติกรรมค่าดัชนีการหักเห่ของแสงที่ติดลบ ที่มุม 150 องศา หรือที่มุมต่ำกว่าจุดอ้างอิง 6 องศา มีความเข้มในการส่งมีค่าสูงที่สุด พบว่าผลการวัดที่ได้ดังกล่าวสอดคล้องกับผลที่ได้จากการออกแบบและการประมวลผลด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เป็นการพิสูจน์ค่าดัชนีการหักเห่ของแสงที่ติดลบในวัสดุโครงสร้าง C4



ภาพที่ 4.23 ข้อมูล 3 มิติที่เก็บจาก Network Analyzer HP8530 พบว่ามีจุดที่พบดัชนีการหักเห่กลับจาก 140 ถึง 155 องศา ที่ความถี่ระหว่าง 10.0-10.5GHz

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวทางการออกแบบโครงสร้างของวัสดุเหนือธรรมชาติหรือ Metamaterials ที่มีคุณสมบัติโครด ไอโซทรอปิกและมีค่าดัชนีการหักเหของแสงที่ติดลบ (Negative Refractive Index, NRI) จากหลักการของทฤษฎีกลุ่ม (Group Theory) ทำให้ได้โครงสร้างในกลุ่ม C_n ซึ่งมีคุณสมบัติไอโซทรอปิกในระนาบของโครงสร้าง วิธีการวัดความต่อเนื่องของลักษณะสมมาตร (Continuous Chirality Measures (CCM)) ได้ถูกนำมาใช้ในการวัดค่าโครลลิตีของโครงสร้าง พบว่าเมื่อแกนของโครงสร้าง (n) เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าโครลลิตีเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และได้ทำการศึกษาการปรับเปลี่ยนค่าโครลลิตีของโครงสร้าง โดยปรับมุมที่เกิดจากแกน H1 ทำกับแกน H2 (มุม B) ในการคาดการณ์ตำแหน่งของช่วงความถี่ที่จะเกิด การสั่นพ้องทางแม่เหล็ก (Magnetic Resonance) ของโครงสร้างได้ใช้หลักการของการวิเคราะห์วงจร (Circuit Analysis) เข้ามาช่วยเพื่อช่วยในการปรับแต่งโครงสร้างให้มีคุณสมบัติค่าดัชนีการหักเหของแสงติดลบที่เกิดจากส่วนจำนวนจริงของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและความซาบซึมทางแม่เหล็กมีค่าติดลบพร้อมกัน (Double Negative NRI) พารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าต่างๆที่ได้จากการคำนวณจากผลการจำลองผลการทดลองด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio® ถูกนำมาช่วยในการวิเคราะห์คุณสมบัติของ ช่วงความถี่แถบผ่านที่เกิดค่าดัชนีการหักเหของแสงติดลบ ในการปรับแต่งโครงสร้างนั้นปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่ายังผลของพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าคือค่าของความเหนี่ยวนำไฟฟ้าและค่าความจุไฟฟ้า (Inductance and Capacitance) ซึ่งจะส่งผลไปถึงตำแหน่งของการเกิดค่าดัชนีการหักเหของแสงติดลบ จากการที่โครงสร้างมีแกน มากถึง 3 ช่วงที่ต่อกัน คือ แกน H1 (แกนหลัก) แกน H2 (แกนย่อย) และแกน H3 (แกนเสริม) จึงช่วยให้สามารถ เพิ่มความหลากหลายในการปรับแต่งโครงสร้าง ให้มากขึ้น ทั้งนี้ได้สร้างวัสดุโครงสร้างต้นแบบ พร้อมทั้งทำการออกแบบชุดการวัดผล และได้ทำการวัดผล ซึ่งผลการวัดที่ได้แสดงค่าที่สอดคล้องกับผลจากการออกแบบและจากการประมวลผลทางคอมพิวเตอร์ แสดงให้เห็นว่าโครงสร้าง C_n สามารถสร้างค่าดัชนีการหักเหของแสงที่ติดลบได้นอกจากนี้ พบว่าโครงสร้างในกลุ่ม C_n นั้นสามารถแสดงคุณสมบัติไอโซทรอปิกได้ในหลายทิศทางในขณะที่โครงสร้างยังคงง่ายต่อการสร้างจริงอีก ซึ่งสามารถแสดงคุณสมบัติไอโซทรอปิกได้มากถึง $2n$ ทิศทางใน 2 มิติ และคาดการณ์ว่าจะสามารถแสดงได้ $6n$ ทิศทางใน 3 มิติ ทั้งยังสามารถปรับแต่งโครงสร้างให้เกิด Double Negative NRI ได้อีก จากการออกแบบและปรับแต่งโครงสร้างในกลุ่ม C_n พบว่าสามารถแสดงคุณสมบัติโครด ไอโซทรอปิกและยังมีค่าดัชนีการหักเหของแสงติดลบ พร้อมทั้งมีอัตราการสูญเสียสัญญาณ (Loss Factor) ต่ำมากซึ่งเป็นคุณสมบัติที่มีประโยชน์และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานได้หลายด้าน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการออกแบบโครงสร้างของ C_n ใน 2 มิติซึ่งให้ผลเป็นที่น่าพอใจคือสามารถแสดงคุณสมบัติไครอล ไอโซทรอปิกและค่าดัชนีการหักเหของแสงดีคลบ ในส่วนทดลองวัดจริง ทั้งในส่วนการสร้างและวัดผล ยังสามารถทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ลักษณะของคุณสมบัติการส่งผ่านและการสะท้อนของสัญญาณตลอดจนถึงค่าดัชนีการหักเหของแสงที่ดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการทดลองจริง มีปัจจัยอื่นๆเข้ามามีผลต่อลักษณะของค่ายังผลของพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น วัสดุที่ใช้ในการทำเป็นแผ่นบอร์ด (Board Substrate) เพื่อใช้ในการพิมพ์โครงสร้างลงไป การจัดวางโครงสร้าง การสร้างโครงสร้างให้ได้ระยะห่างระหว่างเซลล์หน่วยที่เท่ากัน หรือแม้แต่การจัดวางประกอบโครงสร้างให้ตำแหน่งตรงกันพอดี

5.2.2 ในการทดลองในส่วนของการพิสูจน์คุณสมบัติไอโซทรอปิกของโครงสร้างนั้น เราได้นำเสนอโครงสร้าง 2 มิติ และแต่ยังไม่ได้ศึกษาโครงสร้างของกลุ่ม C_n ใน 3 มิติ ซึ่งหากสามารถทำได้จริงตามที่คาดการณ์ไว้ ก็จะเป็นผลดีมากเนื่องจากจะสามารถแสดงคุณสมบัติไอโซทรอปิกได้มากถึง $6n$ ทิศทาง

5.2.3 เนื่องจากคุณสมบัติของโครงสร้างที่ได้ทำการออกแบบไปนั้นสามารถที่จะปรับแต่งได้โดยอาศัยหลักการต่างๆที่ได้นำเสนอไป จึงทำให้โครงสร้างนั้นมีความหลากหลายของคุณสมบัติ จึงเหมาะสมแก่การนำไปศึกษาในการประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ เช่น สายส่งอากาศ (Antennas), อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง (Optoelectronics), อุปกรณ์เชิงแสง (Optical Devices) และอื่นๆ

บรรณานุกรม

- [1] นันทกานต์ วงศ์เกษม และ คณิศร์ มาตรา. (2552). วัสดุเหนือธรรมชาติ. วารสารวิจัย มข. ฉบับ
วิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยี, **14**(2), 133-149.
- [2] Smith, D. R., Padilla, W. J., Vier, D.C., Nemat-Nasser, S.C. and Schultz, S. (2000). A Composite
medium with simultaneously negative permeability and permittivity. **Physical Review Letters**,
84(18), 4184-4187.
- [3] Pendry, J. B. (2004). A chiral route to negative refraction. **Science**, **306**(5700), 1353-1355.
- [4] Pendry, J. B. (2000). Negative refraction makes a perfect lens. **Physical Review Letters**, **85**, 3966-3969.
- [5] Schurig, D., J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr, and D. R. Smith. (2006).
Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies. **Science Express**, **314**, 977.
- [6] Zhang, W., Papakostas, A., Potts, A., Bagnall, D. and Zheludev, N. (2004). **Planar chiral
metamaterials and their application to optoelectronics devices**. Paper presented at the Nano and
Giga Challenges in Microelectronics, Cracow, Poland.
- [7] Wu, B. I., Chen, H., Ran, L., Grzegorzcyk, T.M. and Kong, J. A. (2005). Active radome using
controllable metamaterial. **Progress in Electromagnetics Research Symposium**. (p.25). [n.p].
- [8] Thomas, Z. M. , Grzegorzcyk, T. M. , Wu, B. I. and Kong, J. A. (2006). Enhanced microstrip stopband
filter using a metamaterial substrate. **Microwave and Optical Technology Letters**, **48**(8), 1522.
- [9] Li, H., Qin, Y., Wei, Z., Chen, H., Zhang, Y., Zhou, L. and Chan, C.T. (2004). Directive Metamaterial
Antenna Using High Impedance Surface. **Proceedings of International Conference on Microwave
and Millimeter Wave Technology: 18-21 August 2004, Chinese Institute of Electronics, Beijing,
China**. (pp. 480 – 482). Beijing: Chinese Institute of Electronics.
- [10] Kettle, S. F. A. (1995). **Symmetry and structure**. West Sussex, England: John Wiley & Sons.
- [11] Cotton, F. A. (1971). **Chemical application of group theory**. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [12] Hatfield, W. E. and Parker, W. E. (1974). **Symmetry in chemical bonding and structure**. Ohio, USA:
Charles E. Merrill.
- [13] Carter, R. L. (1998). **Molecular symmetry and group theory**. New York, USA: John Wiley & Sons.
- [14] Shriver, D. F., Atkins, P. W. and Langford, C. H. (1994). **Inorganic chemistry**. 2nd edition. New York,
USA: W. H. Freeman and Company.
- [15] Chen, H., Ran, L.-X., Jiang Tao, H.-F., Zhang, X.-M., Cheng, K.-S., Grzegorzcyk, T.M. and
Kong, J. A. (2004). Left-handed material composed of only S-shaped resonators. **Physical Review E**,
70(5), 057605.

- [16] Wongkasem, N., Akyurtlu, A. and Marx, K. A. (2006). Development of chiral and achiral double negative metamaterials in the THz regime. **Proceedings of 2006 SPIE Symposium on Optics East: Terahertz Physics, Devices and Systems: 1-4 October 2006, SPIE, Boston, MA.** (pp. 63730Z-(1-8)). Boston, MA: SPIE.
- [17] Zabrodsky, H. and Avnir, D. (2006), Continuous symmetry measures, IV: chirality. **Journal of the American Chemical Society**, **117**, 462-473.
- [18] Potts, A., Bagnall, D.M. and Zheludev, N.I. (2004). A new model of geometric chirality for two-dimensional continuous media and planar meta-materials. **Journal of Optics: A Pure and Applied Optics**, **6**(2), 193-203.
- [19] Chen, X., Grzegorzczak, T. M., Wu, B.-I., Pacheco, J., and Kong, J. A. (2004). Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials. **Physical Review E**, **70**, 016608.
- [20] Weir, W. (1974). Automatic measurement of complex dielectric constant at microwave frequencies. **Proceedings of IEEE**, **62**, 33–36.
- [21] Lucarini, V., Saarinen, J.J., Peiponen, K.-E., and Vartiainen, E.M. (2005). **Kramers-Kronig Relations in Optical Materials Research**. Berlin, Germany: Springer Series in Optical Sciences.
- [22] Schuster, A. (1904) . **An Introduction to the theory of optics**. London: Arnold
- [23] Veselago, V. G. (1968). Electrodynamics of substances with simultaneously negative electrical and magnetic permeabilities. **Soviet Physics Uspekhi**, **10**(4), 5-13.
- [24] Pendry, J. B., Holden, A. J., Stewart, W. J. and Youngs, I. (1996). Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures. **Physical Review Letters**, **76**, 4773–4776.
- [25] Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J. and Stewart, W. J. (1999). Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **47**(11), 2075-2084.
- [26] Ziolkowski, R.W. (2003). Design, fabrication, and testing of double negative metamaterials. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, **51**(7), 1516-1529.
- [27] Marqués, R., Medina, F. and Rafii-El-Idrissi, R. (2002). Role of bianisotropy in negative permeability and left-handed metamaterials. **Physical Review B**, **65**, 1-6.
- [28] Baena, J. D., Bonache, J., Martín, F., Sillero, R. M., Falcone, F., Lopetegui, T., Laso, M. A. G., García, J. G., Gil, I., Portillo, M. F., and Sorolla, M. (2005). Equivalent-circuit models for split-ring resonators and complementary split-ring resonators coupled to planar transmission lines. **IEEE Transactions Microwave Theory and Techniques**, **53**(4), 1451-1461.
- [29] Chen, H., Ran, L., Huangfu, J., Zhang, X., Chen, K., Grzegorzczak, T. M., and Kong, J. A. (2004). Left-handed metamaterials composed of only S-shaped resonators. **Physical Review E**, **70**, 057605.

- [30] Wongkasem, N., A. Akyurtlu, and K. A. Marx, Q. Dong, J. Li and W.D. Goodhue (2007). Development of chiral negative refractive index metamaterials for the terahertz frequency regime. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, **55**(11), 3052-3062.
- [31] Padilla, W. J. (2005). **Group theoretical description of artificial magnetic metamaterials utilized for negative index refraction**. Retrieved July 15, 2007, from <http://xxx.lanl.gov/abs/cond-mat/0508307>.
- [32] Padilla, W. J. (2007). Group theoretical description of artificial electromagnetic metamaterials. **Optics Express**, **15**, 1639.
- [33] Wongkasem, N., Akyurtlu, A. and Marx, K. A. (2006). Group theory based design of isotropic negative refractive index metamaterials. **Progress in Electromagnetics Research** , **63**, 295-310.
- [34] Wongkasem, N., Akyurtlu, A. and Marx K. (2007). **Identification and classification of chiral and bi-anisotropic metamaterials**. Paper presented at the URSI 2007, North American Radio Science Meeting, Ottawa, Canada.
- [35] Sihvola, A. (2007). Metamaterials in electromagnetics. **Metamaterials**, **1**(1), 2-11.
- [36] Kock, W.E. (1946). Metal-lens antennas, **Proceedings of IRE**, **34**, 828–836.
- [37] Collin, R.E. (1991). **Field Theory of Guided Waves**, 2nd ed. New York: IEEE Press.
- [38] Rotman, W. (1962). Plasma simulation by artificial dielectrics and parallel-plate media, **IRE Transactions on Antennas and Propagation**, **10**, 82–95.
- [39] Shamonina, E. and Solymar, L. (2006). Properties of magnetically coupled metamaterial elements. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, **300**, 38–43.
- [40] Lindell, I.V., Sihvola, A.H., Tretyakov, S.A. and Viitanen, A.J. (1994). **Electromagnetic waves in chiral and bi-isotropic media**. Boston: Artech House, Norwood, MA.
- [41] Serdyukov, A., Semchenko, I., Tretyakov, S., Sihvola, A. (2001). **Electromagnetics of bi-anisotropic materials: theory and applications**. Amsterdam: Gordon and Breach.
- [42] Lindell, I.V., Sihvola, A.H. (2005). Perfect electromagnetic conductor, **Journal of Electromagnetic Waves and Applications**, **19** (7), 861–869.
- [43] Lindell, I.V. and Sihvola, A.H. (2006). Realization of the impedance boundary, **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, **54**(12), 3669–3676.
- [44] Belov, P.A., Marqu' es, R., Maslovski, S.I., Nefedov, I.S., Silveirinha, M., Simovski, C.R. and Tretyakov, S.A. (2003). Strong spatial dispersion in wire media in the very large wavelength limit. **Physical Review B**, **67**(11), 113103(4).
- [45] McCall, M. W., Lakhtakia, A. and Weiglhofer, W. S. (2002). The negative index of refraction demystified. **European Journal of Physics**, **23**, 353-359.

- [46] Depine, R.A. and Lakhtakia, A. (2004). A new condition to identify isotropic dielectric–magnetic materials displaying negative phase velocity. **Microwave and Optical Technology Letters**, **41**, 315–316.
- [47] J.D. Jackson. (1999). **Classical Electrodynamics**. 3th edition. New York :Wiley.
- [48] Varadan, V. V. and Ro, R. (2006). Analyticity, causality, energy conservation and the sign of the imaginary part of the permittivity and permeability. **Digest, IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium**, 499-502.
- [49] Markos, P. and Soukoulis, C. (2003). Transmission properties and effective electromagnetic parameters of double negative metamaterials. **Optics Express**, **11**, 649-661.
- [50] Markel, V. A. (2008). Can the imaginary part of permeability be negative. **Physical Review E**, **78**, 026608(1–8) .
- [51] Ali, A. and Hu, Z. R. (2006). **Negative permittivity metamaterial for microwave circuit applications**. Paper presented at The Institution of Engineering and Technology Seminar on, London, UK.
- [52] Buell, K., Mosallaei, H. and Sarabandi, K. (2007). Metamaterial insulator enabled superdirective array. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, **55**, 1074-1085.
- [53] Chen, H., Wu, B.-I., Ran, L., Grzegorzczak, T. M. and Kong, J. A. (2006). Controllable left-handed metamaterial and its application to a steerable antenna. **Applied Physics Letters**, **89**, 053509.
- [54] Baev, A., Samoc, M., Prasad, P.N., Krykunov, M. and Autschbach, J. (2007). A quantum chemical approach to the design of chiral negative index materials. **Optics Express**, **15**(9), 5730-5741.
- [55] Kwon, D.-H., Werner, D. H., Kildishev, A. V. and Shalaev, V. M. (2008). Material parameter retrieval procedure for general bi-isotropic metamaterials and its application to optical chiral negative-index metamaterial design. **Optics Express**, **16**(16), 11822-11829.
- [56] Gay-Balmaz, P. and Martin, O. J. F. (2002). Efficient isotropic magnetic resonator. **Applied Physics Letters**, **81**(5), 939-941.
- [57] Jelinek, L., Baena, J. D., Marques, R. and Zehentner, J. (2006). **3D magnetic resonators for isotropic metamaterial design**. Paper presented at the International Conference Radioelektronika 2006. [n.p.].
- [58] Baena, J.D., Jelinek, L., Marqués, R. and Zehentner, J. (2006). Electrically small isotropic three-dimensional magnetic resonators for metamaterial design. **Applied Physics Letters**, **88**, 134108.
- [59] Sihvola, A. (1999). **Electromagnetic mixing formulas and applications**. Cornwall. Padstow: T J Internation.
- [60] Potts, A., Papakostas, A., Zheludev, N. I., Coles, H. J., Greef, R. and Bagnall, D. M. (2003). Planar chiral meta-materials for photonic devices. **Journal of Materials Science: Materials in Electronic**, **14**, 393-395.

- [61] Wongkasem, N., Akyurtlu, A., Marx, K. A., Goodhue, W.D., Li, J., Dong, Q. and Ada, E. (2007).
Lithographic fabrication of a novel micron scale metamaterials structures-based chiral
metamaterial: theoretical experimental and analysis of its Y- chiral and negative index of refraction
properties in the terahertz and microwave regime. **Microscopy Research and Technique**,
70, 497-505.
- [62] Wongkasem, N. (2008). Identification of material parameters in complex metamaterials by
group theory. **Technology and Innovation for Sustainable Development Conference**
(TISD 2008). (pp.403-407). Khon Kaen: Khon Kaen University.
- [63] Wongkasem, N. (in press). Analysis and categorization of nano-artificial magnetic metamaterials by
group theory. **KKU Research Report 2008**.
- [64] Papakostas, A., Potts, A., Bagnall, D.M., Prosvirnin, S.L., Coles, H.J. and Zheludev, N.I. (2003).
Optical manifestations of planar chirality. **Physical Review Letters**, **90**(10), 107404.
- [65] Avnir, D., Puschinsky, A., Pinsky, M., Zayit, A., Dryzun, C. and Elgavi, H. (2006). **Continuous**
Chirality Measure. Retrieved July 15, 2007, from [http:// www.csm.huji.ac.il/
index.php?page=help](http://www.csm.huji.ac.il/index.php?page=help).
- [66] Zabrodsky, H., Peleg, S. and Avnir, D. (1995). Symmetry as a Continuous Feature. **IEEE**
Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **17**(12), 1154-1166.
- [67] Graneau, P. (1985). **Ampere–Neumann electrodynamics of metals**. Nonantum: Hadronic Press.
- [68] Grover, F.W. (1946). **Inductance calculations - working formulas and tables**. New York:
D. Van Nostrand Co.
- [69] Peoglos, V. (1988). Measurement of the magnetostatic force of a current circuit on a part of itself.
Journal of Physics D: Applied Physics, **21**, 1055-1061.
- [70] Bueno, M. and Assis, A. K. T. (1997). Equivalence between the formulas for inductance calculation.
Canadian Journal of Physics, **75**, 357–362.
- [71] Chen, H. S., Ran, L. X., Huangfu, J. T., Zhang, X. M. and Chen, K. S. (2005). Magnetic properties of S-
shaped split-ring resonator. **Progress in Electromagnetics Research**, **51**, 231–247.
- [72] Gedney, S. (2006). **Computational electromagnetics: The Finite-Difference Time Domain**. Retrieved
July 15, 2007, from <http://www.engr.uky.edu/~gedney/courses/ee624/>
- [73] Taflove, A. and Hagness, S. C. (2000). **Computational electrodynamics: the finite-difference time-**
domain method. 2nd edition, Boston: Artech House.
- [74] Kafesaki, M., Koschny, Th., Penciu, R. S., Gundogdu, T. F., Economou, E. N. and Soukoulis, C. M.
(2005). Left-handed metamaterials: detailed numerical studies of the transmission properties
Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, **7**, S12-S22.

- [75] Rahmat-Samii, Y. (2006). **Metamaterials in antenna applications: classifications, designs and applications**. Paper presented at the 2006 IEEE International Workshop, Antenna Technology Small Antennas and Novel Metamaterials, White Plains, New York.
- [76] Katsarakis, N., Koschny, T., Kafesaki, M., Economou, E. N. and Soukoulis, C. M. (2004). Electric coupling to the magnetic resonance of split ring resonators **Applied Physics Letters**, **84**(15), 2943-2945.
- [77] Sabah, C. (2008). Left-handed chiral metamaterials. **Central European Journal of Physics**, **6**(4), 872-878.
- [78] Marques, R., Martel, J., Mesa, F. and Medina, F. (2002). A new 2D isotropic left-handed metamaterial design: theory and experiment, **Microwave and Optical Technology Letters**, **35**, 405-408.
- [79] Koschny, Th., Zhang, L. and Soukoulis, C. M. (2005). Isotropic three-dimensional left-handed metamaterials. **Physical Review B**, **71**(12), 121103.

Output ที่ได้จากโครงการวิจัย

1. ตีพิมพ์ บทความ “Left-handed Chiral Isotropic Metamaterials: Analysis and Detailed Numerical Study” ที่วารสาร *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* **11**, 074011 June 2009
(Impact Factor = 1.742)
2. เข้าร่วมการประชุมวิชาการนานาชาติ ITC-CSCC 2009 ที่ประเทศเกาหลี ทั้งได้ ตีพิมพ์บทความ “Optimized Isotropy in Left-Handed Metamaterials” ใน Proceedings ของ Conference July 2009
3. ตีพิมพ์ บทความ “Light Splitting Effects in Chiral Metamaterials” ที่วารสาร *Journal of Optics* **12**, 035101 (Impact Factor = 1.742) January 2010

ภาคผนวก

ก. บทความ “Left-handed Chiral Isotropic Metamaterials: Analysis and Detailed Numerical Study”

ที่วารสาร *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* 11, 074011.

ข. บทความ “Optimized Isotropy in Left-Handed Metamaterials” ใน Proceedings ของ ITC-CSCC 2009 Conference

ค. บทความ “Light splitting effects in chiral meta-materials” ที่วารสาร *Journal of Optics* 12, 035101

Left-handed chiral isotropic metamaterials: analysis and detailed numerical study

K Matra¹ and N Wongkasem^{1,2,3}

¹ Department of Electrical Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40002, Thailand

² Electrical and Computer Engineering Department, University of Massachusetts, Lowell, MA 01854, USA

E-mail: nantakan@kku.ac.th

Received 30 April 2009, accepted for publication 13 May 2009

Published 29 May 2009

Online at stacks.iop.org/JOptA/11/074011

Abstract

Chiral isotropic metamaterials with a negative index of refraction design consisting of arrays of a sole structure are proposed. The C_n point group is selected based on its chiral and isotropic properties. A circuit analysis model is obtained for the double negative NIR passband design. The structure's orientation provides flexibility to adjust the properties. Structure modification, based on the capacitance and inductance value, controls the locations of the structure's effective material parameters and the double negative NIR passband. These proposed designs give the highest possible rank of isotropy. The negative index of refraction is also validated.

Keywords: left-handed materials, chiral, isotropic, negative refractive index, metamaterials

(Some figures in this article are in colour only in the electronic version)

1. Introduction

Metamaterials or artificial electromagnetic (EM) materials are manmade materials, designed to perform within a certain operating frequency. The lattice constant or the periodic dimension of the structure is very small compared to the operating wavelength [1]; hence, the materials behave homogeneously as bulk media. One of the most popular properties of these materials is the negative index of refraction (NIR), which is the reason why they are sometimes called NIR, left-handed or backward metamaterials, according to their electromagnetic properties. These unique properties lead to numerous applications [2–5].

A negative index of refraction is initiated by the assumption of Veselago [6] i.e. the direction of phase velocity, indicated by the real part of the index of refraction, and the direction of energy flow are opposite. This requires the real parts of permittivity and permeability to be negative simultaneously. Therefore, this material is called a double negative NIR. Later on, there is another less restricted condition found to pursue the negative phase velocity

³ Author to whom any correspondence should be addressed.

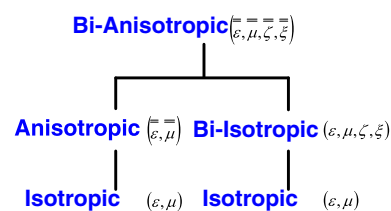
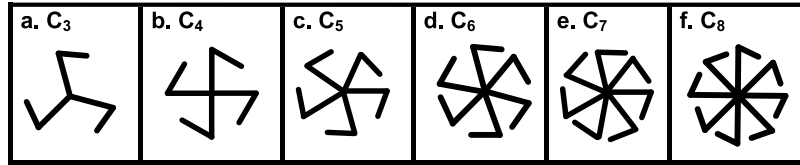
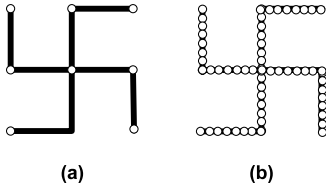
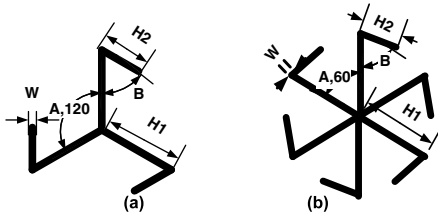


Figure 1. Family tree of complex electromagnetic materials.

i.e. $\mu_i \epsilon_r + \mu_r \epsilon_i < 0$ [7, 8], where only one real part is necessary to be negative. In this case, the negative pair needs to be greater than the positive pair. This type of NIR is called a single negative NIR. Nevertheless, it can be seen that this condition can also be true if the imaginary part is negative; presently, the possibility of negative values of the imaginary parts of the effective material parameters is confirmed by a number of studies [9–11].

The conventional double negative NIR metamaterial design, operating in the x band, consists of arrays of wires and split ring resonators (SRR) [12], where negative electric permittivity and negative magnetic permeability

Figure 2. Structures designed from C_3 – C_8 groups.Figure 3. Points used to calculate the chirality index from (a) continuous chirality measures and (b) angular bisection methods of a C_4 structure.Figure 4. (a) C_3 and (b) C_6 structure and its geometrical parameters.

are generated, respectively. However, the NIR band of these bi-anisotropic [12–15] composites presents high losses [12, 13, 16]. There are several proposals to overcome this, such as adapting the SRR structure to be more isotropic [13, 17, 18], designing the NIR band from a single resonance structure [19, 20], etc. Being isotropic can not only improve the quality of the NIR band, but it will also add more degrees of freedom to any design that requires flexibility of the excitation direction.

Recently, there have been many studies of chirality (K) conducted in metamaterials [21–33] in three main interesting aspects, i.e. studying two- and three-dimensional chirality in metamaterials, generating negative phase velocity materials with high chirality and enhancing the transmission properties of metamaterials by a suitable value of chirality. Firstly, the transmission properties of planar chiral metamaterials have been studied intensively in x band and terahertz regimes [30–33]. The optical activity in three-dimensional chiral metamaterials has also been reported. It is due to electromagnetic coupling [27], mutual orientation of the material structure, and the incident EM wave [28, 29]. Secondly, chiral material can generate a backward wave if its optical activity is strong [25, 26] or the product of the electric permittivity, ϵ , and the magnetic permeability, μ , of the material is smaller than K [34, 35]. This idea has been opening up new opportunities in nanometamaterial design [36]. Lastly, the way chirality affects other properties of metamaterials [37–39] is also significantly helpful for metamaterial design. Furthermore, chirality alone with its strong polarization effects leads to many applications in photonic devices [22, 24].

In this paper, we propose a new design of left-handed chiral isotropic metamaterials which consist of arrays of a lone structure. Group theory and circuit analysis [20, 40] are used to obtain the isotropic, chiral and NIR properties. These structures are proved analytically to contain the chirality by the continuous chirality measure (CCM) [41] and angular bisection [42] methods. The designs lead to the highest rank of isotropy, but are still compromised to ease the fabrication.

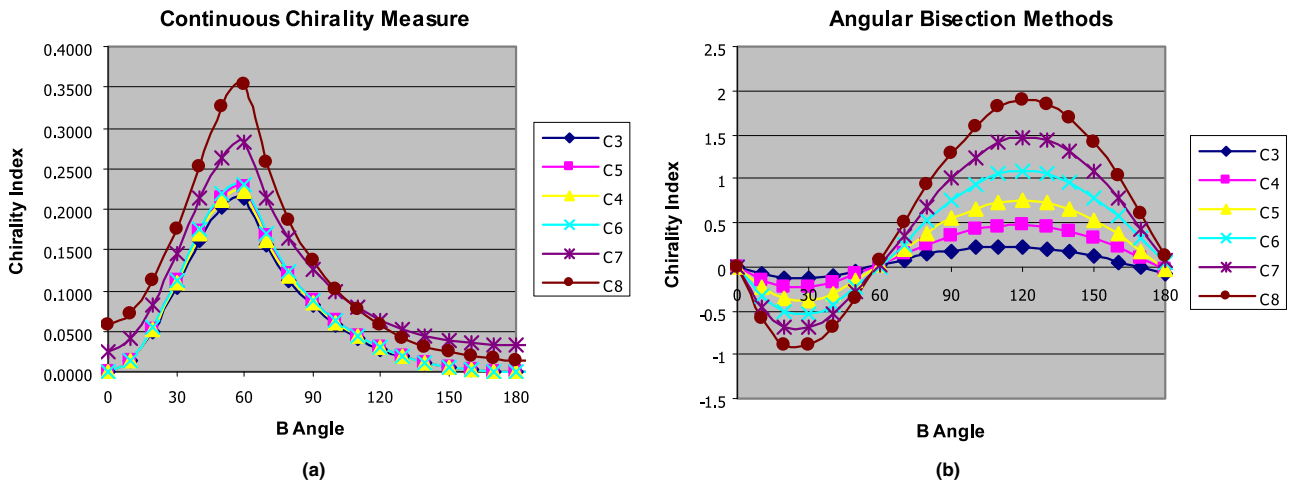


Figure 5. Chirality index calculated from the (a) CCM and (b) angular bisection method.

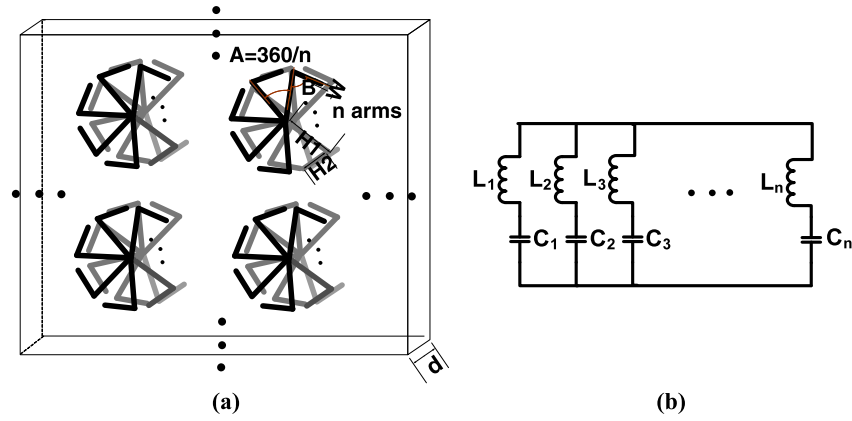


Figure 6. (a) C_n stack consisting of four pairs of the structures and (b) the equivalent circuit of a pair of the structures.

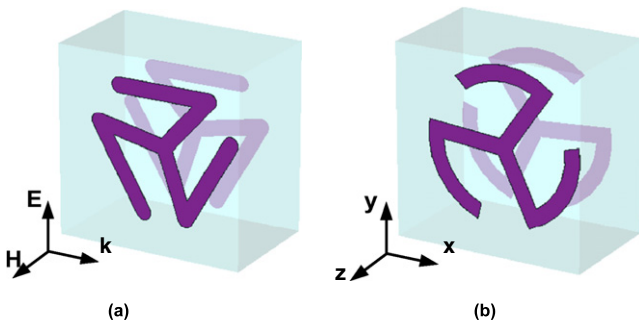


Figure 7. Structure designed from the C_3 group with (a) straight arms and (b) curved arms. The unit cell size is $10.2 \text{ mm} \times 10.2 \text{ mm} \times 6.34 \text{ mm}$. PEC and PMC boundaries are set at the planes which are normal to the $\mathbf{E}$ field and $\mathbf{H}$ field directions, respectively, to form a periodic structure. The structure is made of copper. The dimensions are as follows: linewidth, $w = 0.85 \text{ mm}$, $H1 = 3.83 \text{ mm}$, $H2 = 5.1 \text{ mm}$, structure thickness = 0.0112 mm . The distance between the two structures is $d = 3.175 \text{ mm}$. The radius of the curved- C_3 structure is 3.83 mm .

CST Microwave Studio[®] software together with the finite-difference time-domain (FDTD) method are used to study the transmission and reflection properties which later will be used to extract [43] the effective material parameters and index of refraction of the designs. The complex values of the material parameters are double checked using Kramers–Kronig relations [44]. The results have shown that the new designs will be further promising candidates for left-handed metamaterials.

2. Chirality and isotropy of C_n structures

Complex EM materials can be categorized into four groups: isotropy, bi-isotropy, an-isotropy and bi-anisotropy, with regard to their electromagnetic parameters [45]. Bi-anisotropic materials are the most common found in nature. They contain all co-(permittivity, ϵ , and permeability, μ) and cross-polarization (electric to magnetic coupling, ξ and magnetic

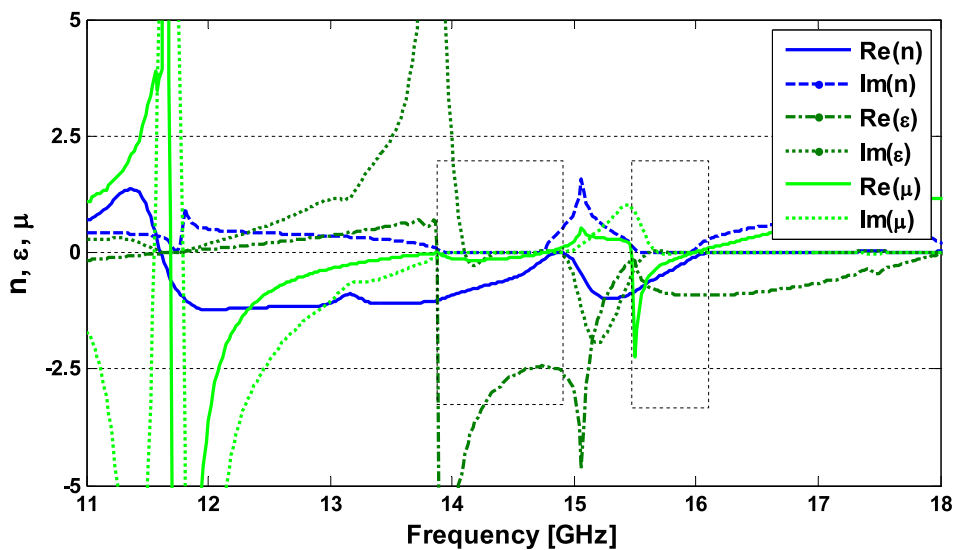


Figure 8. Effective parameters, permittivity (ϵ), permeability (μ) and index of refraction (n) of the structure designed from the C_3 group with straight arms.

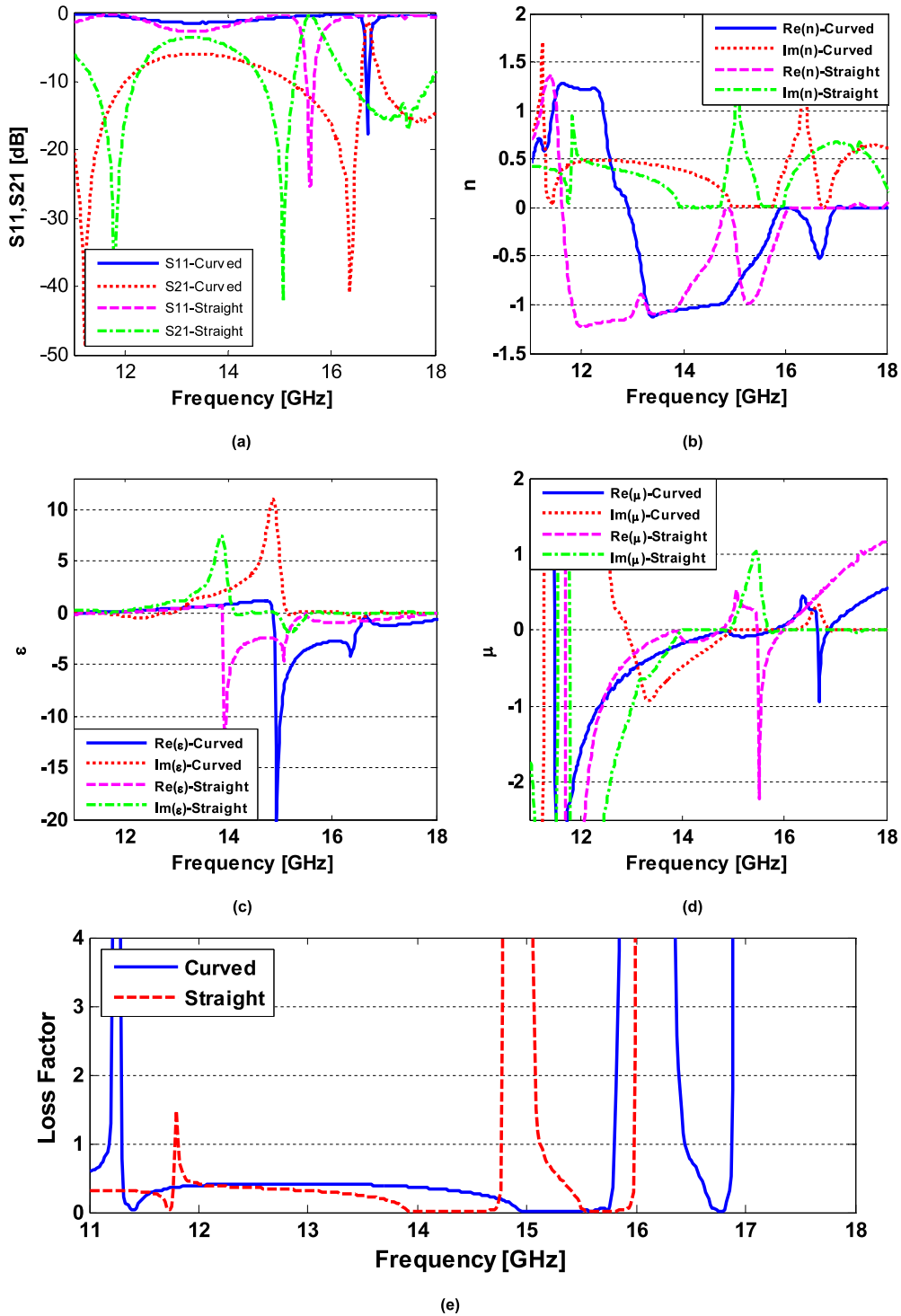


Figure 9. (a) S_{21} and S_{11} parameters, (b) real and imaginary parts of the refractive index, (c) real and imaginary parts of the permittivity, (d) real and imaginary parts of the permeability and (e) loss factor of the C_3 unit with straight and curved arm orientations shown in figure 8.

to electric coupling, ζ) terms in a tensor form. The cross-polarized terms are linked to chirality and reciprocity [46]. While bi-anisotropic media are the most complex, isotropic media are considered to be the simplest; they contain only a scalar value of permittivity and permeability. Bi-isotropic media also contain the abovementioned four EM parameters but in a scalar form. In addition, there are only tensor permittivity and permeability in anisotropic media. The

complex electromagnetic materials and their parameters are described in the family tree shown in figure 1 [47].

Group theory, based on the concept of symmetry of atoms in molecules, has been utilized for metamaterial design [48–53]. This method simplifies the design process by making a shortcut to a potential structure that contains the required material parameters [47]. In this paper, the C_n point group is chosen to be our chiral isotropic structure

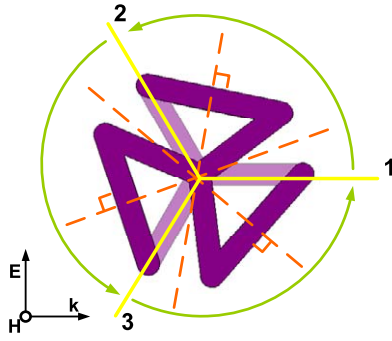


Figure 10. Three symmetry parts (1 → 2, 2 → 3 and 3 → 1) of the C_3 unit with respect to the directions of propagation ($\mathbf{k}$) and fields ($\mathbf{E}$ and $\mathbf{H}$).

candidate. The material parameters of this group are presented in equation (1) [47].

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & 0 \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix}, \quad \mu = \begin{bmatrix} \mu_{xx} & \mu_{xy} & 0 \\ \mu_{yx} & \mu_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{zz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\xi = \begin{bmatrix} \xi_{xx} & \xi_{xy} & 0 \\ \xi_{yx} & \xi_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{zz} \end{bmatrix}, \quad \zeta = \begin{bmatrix} \zeta_{xx} & \zeta_{xy} & 0 \\ \zeta_{yx} & \zeta_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \zeta_{zz} \end{bmatrix}$$

where the parameters on the plane x - y are alike, i.e. $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx}$, $\mu_{xx} = \mu_{yy} = \mu_{xy} = \mu_{yx}$, $\xi_{xx} = \xi_{yy} = \xi_{xy} = \xi_{yx}$, and $\zeta_{xx} = \zeta_{yy} = \zeta_{xy} = \zeta_{yx}$. The cross-polarization terms verify the chirality of the structure, while the existence of the identical parameters declares the isotropic property on the x - y plane. Figure 2 shows the designed structure initiated from the C_n point group.

The chirality of these structures is then calculated using a continuous chirality measure (CCM) [41] and an angular bisection [42] method. The angular bisection method obtains the chirality index from a group of any three points on the structure, while the CCM uses points which offer the shortest distance to the mirror axis where the structure shows the most

symmetry. An example of the points used to calculate the chirality from a C_4 structure is shown in figure 3. Both methods are based on the principle that chirality is defined by a lack of certain symmetry. An example of the structures obtained from C_3 and C_6 groups is shown in figure 4. $H1$ and $H2$ are the main axis and the arm of the structures, respectively. w is the linewidth. A is the angle between two axes and B is the angle between an axis and an arm.

Figure 5 presents the comparison of the chirality index of structures C_3 – C_8 when the angle B is varied. The maximum chirality value obtained from the CCM and angular bisection methods occurs at 60° and 120° , respectively. The use of different points to calculate the chirality is the main reason why there is a shift between the maximum points in the two methods. A similar result has also been found in the well known chiral structure, Gammadion [23]. However, in both cases, the chirality index increases when the number of arms (n) increases. According to the symmetry of the structures, the angle B with the value of 360° – 180° will give the same result as the one with the angle of 0° – 180° [40]. Therefore, another maximum point is found at 300° and 240° for the CCM and angular bisection methods, respectively. It can also stress that the structure C_8 with the maximum value of chirality index 0.35 from CCM, and 1.89 from angular bisection method, is almost two and respectively four times more than that of the Gammadion or C_4 structure. This can be explained by the symmetry distance (SD) of the shapes [54].

3. Negative index of refraction approach

The circuit analysis model [19, 20, 55] is one of several ways to approach the negative index of refraction (NIR) design [56, 57]. A split ring resonator (SRR), one of the two parts of the conventional wire-SRR NIR metamaterials, is analyzed as a resonance circuit (LC circuit). Previous studies have shown that besides generating $-\mu$ right after its magnetic resonance, the SRR can also produce $-\varepsilon$, but at an approximately two to three times higher frequency than that of

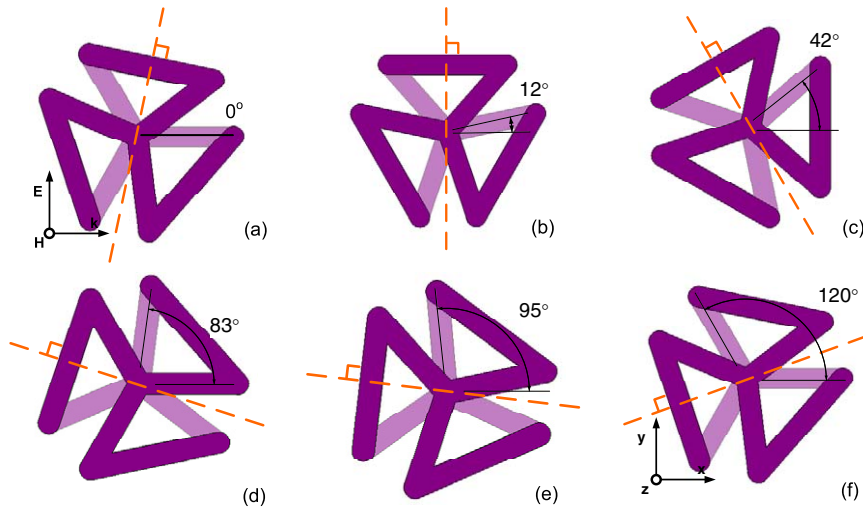


Figure 11. Six different placements of the C_3 unit rotating from 0° to 120° to complete the symmetry part: (a) 0° , (b) 12° , (c) 42° , (d) 83° , (e) 95° and (f) 120° angle.

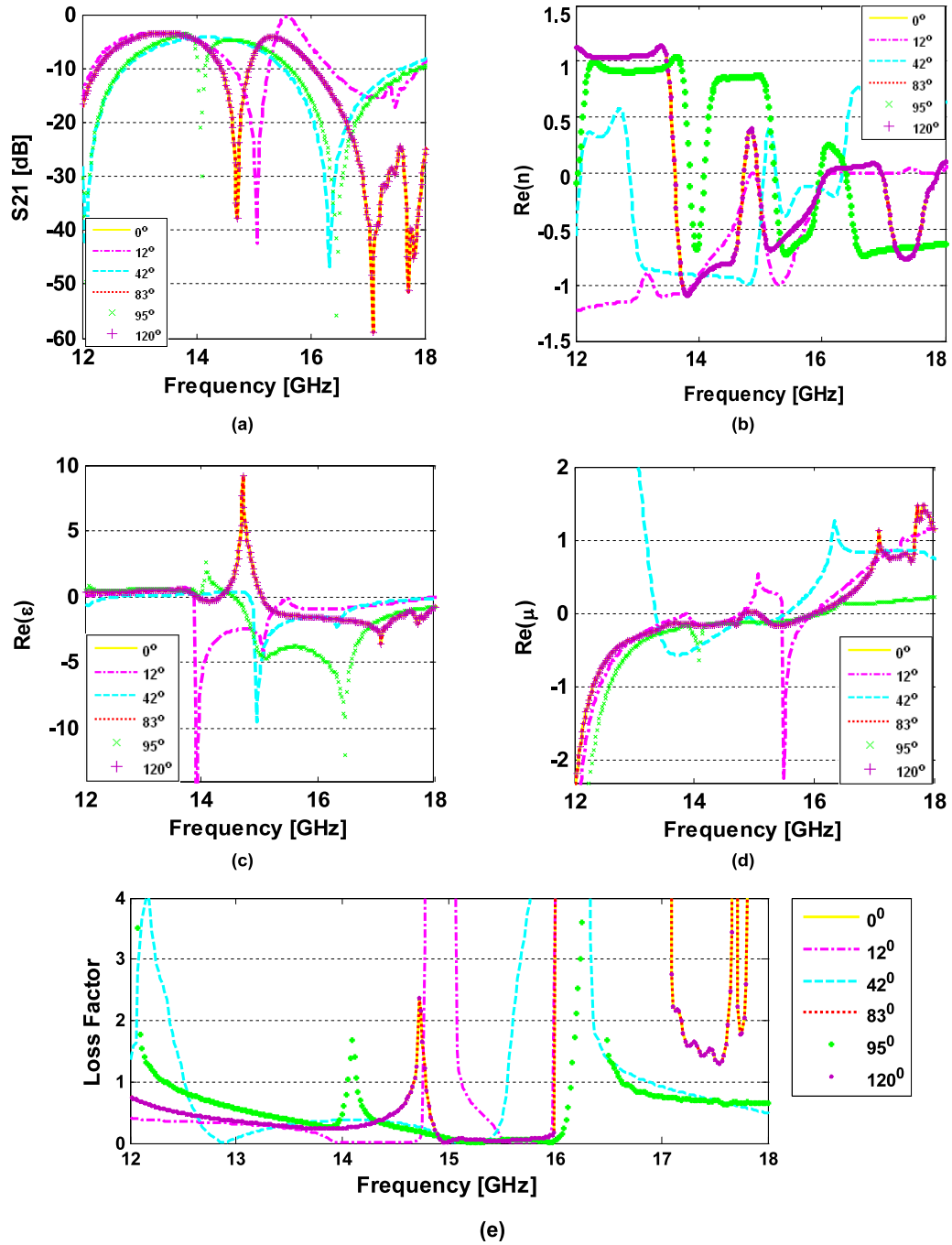


Figure 12. (a) The S_{21} parameter, (b) the real part of the index of refraction, (c) the real part of the permittivity, (d) the real part of the permeability and (e) the loss factor of the C_3 unit with six different placements as shown in figure 11.

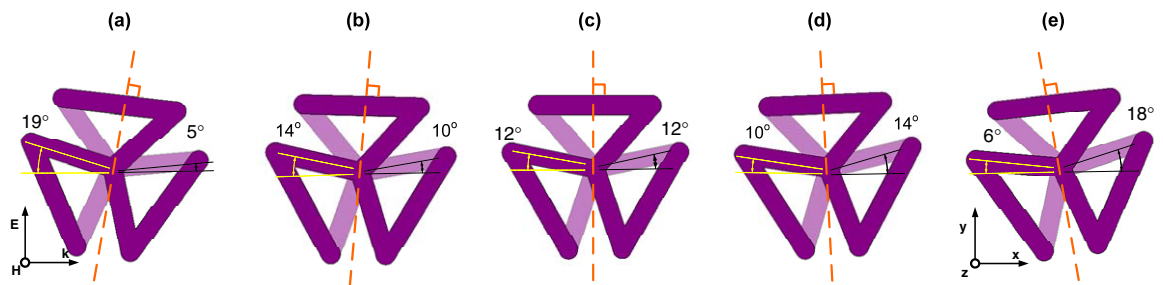


Figure 13. Five different placements of the C_3 unit rotating from 5° to 18° ; (a) 5° , (b) 10° , (c) 12° , (d) 15° and (f) 18° angle.

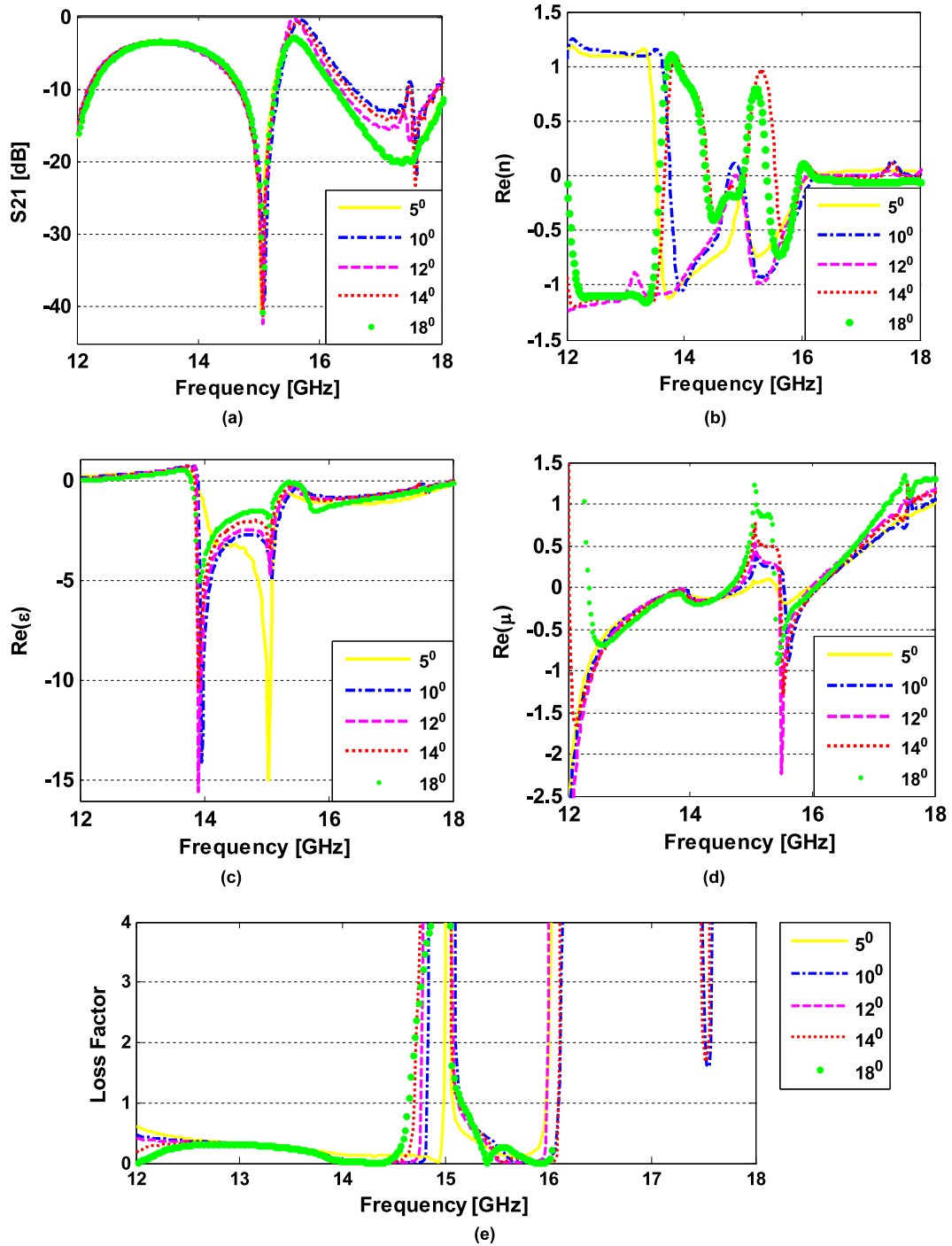


Figure 14. (a) The S_{21} parameter, (b) the real part of the refraction index, (c) the real part of the permittivity, (d) the real part of the permeability and (e) the loss factor of the C_3 unit with six different placements shown in figure 4.

$-\epsilon$ [19, 58]. Hence, in order to make the two locations overlap to generate the double negative NIR band, the frequency of $-\epsilon$ must be moved down and at the same time the location of $-\mu$ must be tuned up [19, 59].

By applying the circuit model, the arrangement, shape and dimensions of the designed C_n have been adjusted to fulfil the double negative NIR criterion. The wave indicated as $\mathbf{k}$ is propagated through the structure plane. The electric field, $\mathbf{E}$, is perpendicular to the plane, while the magnetic field, $\mathbf{H}$, is

parallel to the plane. A C_n stack, which imitates the design used in the experimental measurements, is carried out, and its equivalent circuit of one pair of the structures is illustrated in figures 6(a) and (b), where w is the linewidth, $H1$ is the length of the main axis, $H2$ is the length of each arm, starting from the center to the beginning of the arm, A is the angle between the main axes, while B is the angle between the main axis and the arm; g is the gap between structures and d is the distance between the substrates forming the stack.

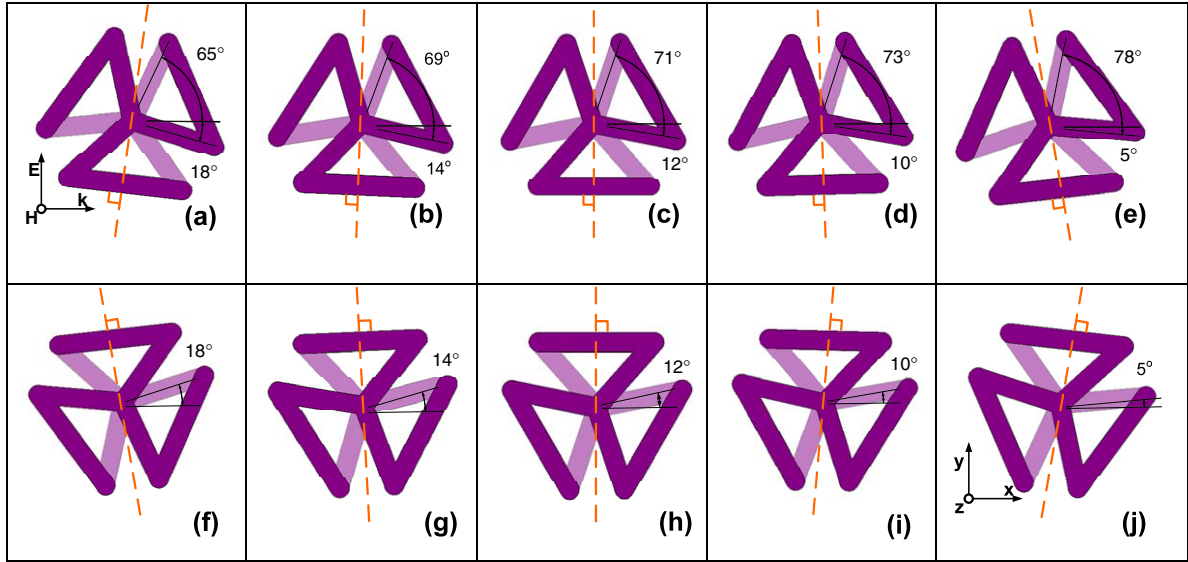


Figure 15. Ten different placements of the C_3 unit rotating from 65° to 78° ; (a) 65° , (b) 69° , (c) 71° , (d) 73° and (e) 78° , and from 5° to 18° ; (f) 18° , (g) 14° , (h) 12° , (i) 10° and (j) 5° .

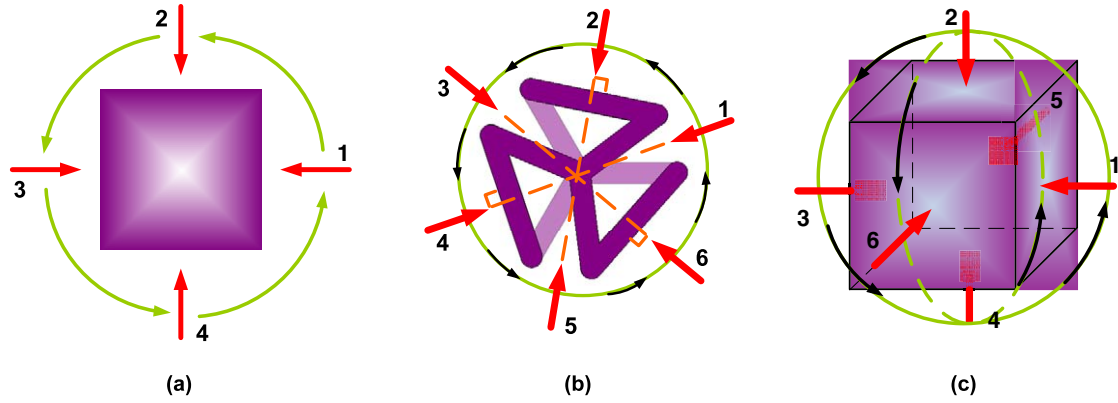


Figure 16. The arrow shows the excitation direction where (a) conventional 2D, (b) C_3 -2D and (c) conventional 3D isotropic structures generate an identical response.

The magnetic resonance frequency, predicting the location of negative permeability, of the equivalent circuit of the pair of the structures, shown in equation (2), is calculated from the total capacitance, C_T , and the total inductance, L_T .

$$\omega_{m0} = \sqrt{\frac{1}{L_T C_T}} \quad (2)$$

where $C_T = nC$ and $L_T = \frac{L}{n}$.

The inductance of each branch can be obtained from equation (3).

$$L = \left(1 + \frac{H2}{H2 + 2H1}\right) \frac{\mu_0}{2\pi} [2H1 \ln(H1/W) + H2 \ln(H1/W) - 2(H1 + H2) \times \sinh^{-1}(H2^2 / \sqrt{(2H1H2)^2 - H2^4}) - 2H1 \times \sinh^{-1}(2H1^2 - H2^2 / \sqrt{(2H1H2)^2 - H2^4}) - (2H1 + H2)]. \quad (3)$$

This inductance is calculated by deriving the force between closed circuits: a closed circuit and a part of itself [60–62], not by means of Ampere's force or Grassmann's force [63]. The capacitance can simply be obtained by considering the part as two parallel plates of the area, $wH2$ separated by the distance, d [20, 55], approximately equal to the following:

$$C = \frac{\epsilon_0 w H2}{d} - \frac{\epsilon_0 w H2}{l - d} \quad (4)$$

where $l = 2H1 + H2$.

This circuit analysis is used to design the structure dimensions and stack arrangement guided by the desired NIR band in the microwave regime within the range of 12–18 GHz. Time-varying wave propagation of the system is studied using CST and the finite-difference time-domain method to double check the accuracy of the design. A parametric study of the C_n structures will be discussed in section 4.

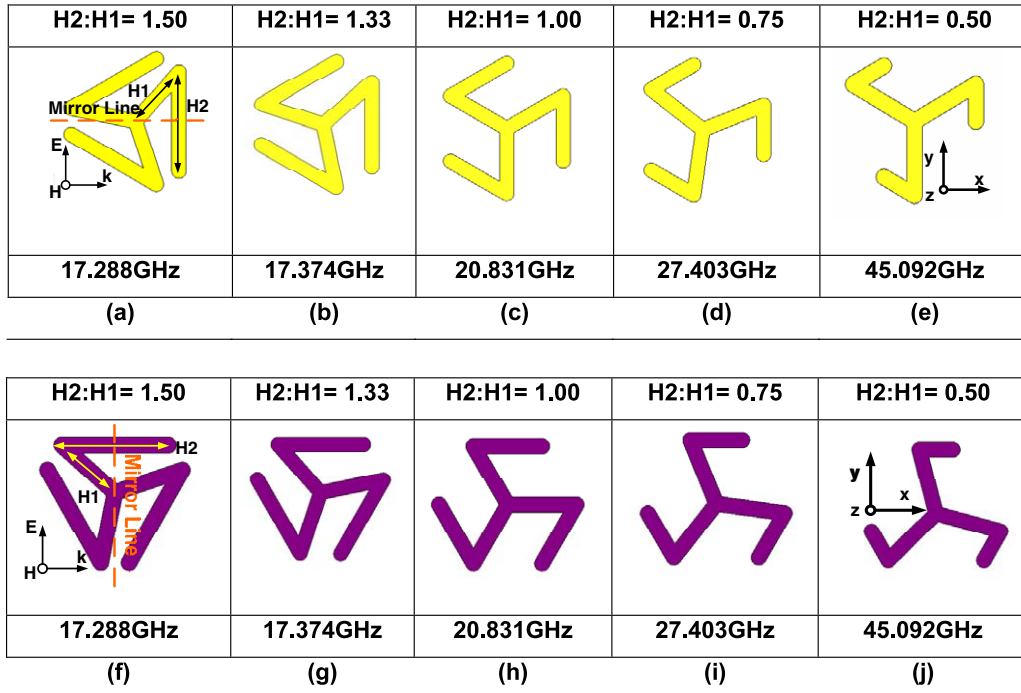


Figure 17. Structures designed from the C_3 group with the ratio $H2:H1$ (a) 1.50, (b) 1.33, (c) 1.00, (d) 0.75 and (e) 0.50 where k is parallel to the mirror line and (f) 1.50, (g) 1.33, (h) 1.00, (i) 0.75 and (j) 0.50 where k is normal to the mirror line.

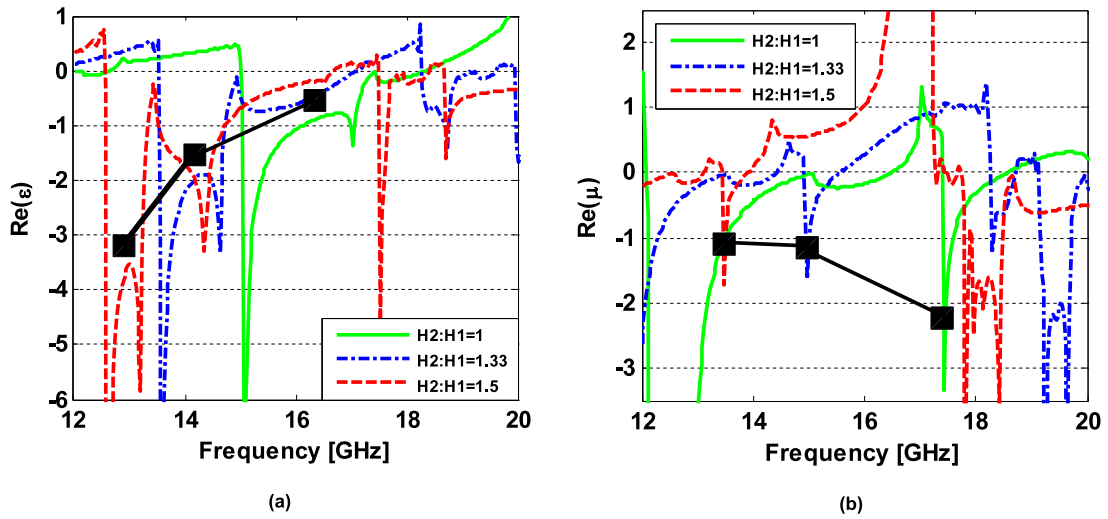


Figure 18. Effective parameters of the C_3 units when the ratio $H2:H1$ is varied. The direction of propagation, k , is parallel to the mirror line; the real part of the (a) permittivity and (b) permeability.

4. Parametric study of C_n structures

A parametric study of the C_n structures, the left-handed chiral isotropic metamaterial candidate, is discussed. The main properties i.e. chirality, isotropy and negative refractive index are combined to pursue the proposed concept. Transmission and reflection coefficients (S_{21} and S_{11} parameters) are obtained by CST Microwave Studio® software together with the finite-difference time-domain (FDTD) method. The effective material parameters and the index of refraction are then retrieved [43, 64]. The relation between the real and imaginary part of the effective parameters is double checked

with Kramers–Kronig relations [44]. The loss factor, $|n_i/n_r|$, is also taken into consideration. Several significant parameters, discussed in this section, will ease the understanding of the metamaterial design.

4.1. Curved versus straight arms

The pair of C_3 structures is considered as a C_3 unit. The dark color represents the C_3 structure on the top layer and the lighter color shows the C_3 structure on the other layer. The arm orientations of the C_3 unit are investigated. Figure 7 presents a pair of C_3 units with straight (a) and curved arms

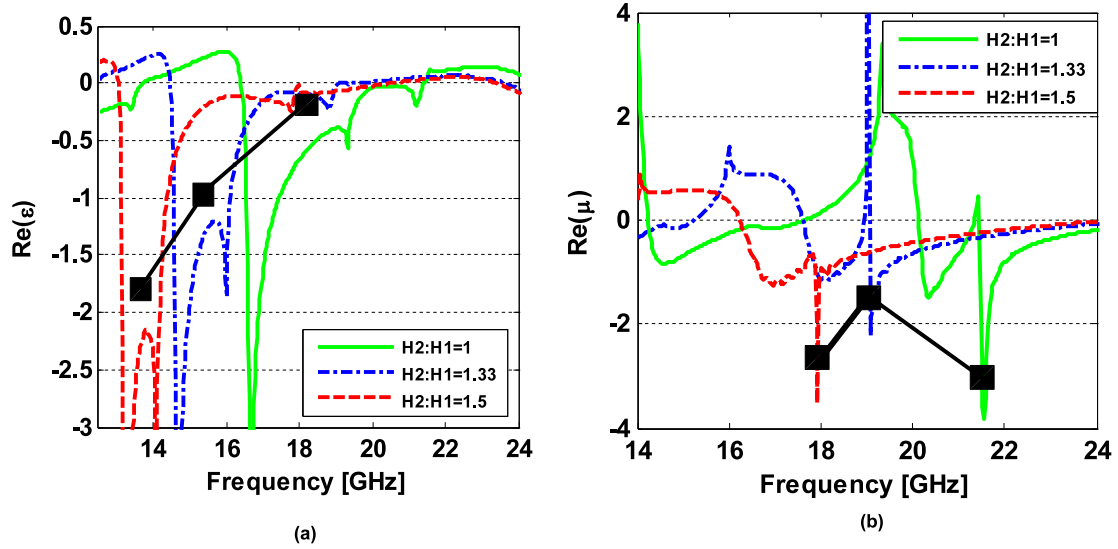


Figure 19. Effective parameters of the C_3 units when the ratio $H2:H1$ is varied. The direction of propagation, $\mathbf{k}$, is perpendicular to the mirror line; the real part of the (a) permittivity and (b) permeability.

(b), respectively. The directions of the electromagnetic field and wave propagation are shown. Each arm loop behaves as a magnetic resonator; hence, there are three sets of resonators connected in a parallel format for this C_3 unit.

The effective material parameters and the index of refraction of the designed straight arm C_3 unit are presented in figure 8. There are two overlaps where $\epsilon_r < 0$ and $\mu_r < 0$, illustrated by a dotted rectangle. The second overlap from 15.5 to 16.0 GHz is the overlap between an electric resonance ($\omega = \omega_{e0}$) and a magnetic resonance ($\omega = \omega_{m0}$) while the first interval from 13.8 to 14.8 GHz is the overlap between the electric resonance and the low negative permeability. A negative index passband occurs at the regions satisfying Veselago's assumption [4]. This type of NIR will later be called a double negative NIR band. Prior to the NIR bands, there are two other $-n$ bands at 11.7–13.8 GHz and 15–15.5 GHz, respectively. These bands assure the negative phase velocity condition i.e. $\epsilon_r \mu_i + \mu_r \epsilon_i < 0$ [8]. This NIR will be considered as a single NIR band.

Figure 9 illustrates comparison plots of the parameters from the straight- C_3 and curved- C_3 units. The transmission (S_{21}) and reflection (S_{11}) coefficients are shown in figure 9(a). The effective material parameters, the permittivity (ϵ), the permeability (μ) and the index of refraction (n), both the real and imaginary parts, are illustrated in figures 9(b)–(d) and the loss factor is presented in figure 9(e).

The transmission and reflection coefficients and the material parameters of both cases are similar; only the NIR passband (15.5–16.0 GHz) of the straight arm C_3 occurs at a lower frequency. The passband is also wider than that of the curved arm C_3 (16.6–16.8 GHz). The shift of the NIR bands can be explained by the location of the $(-)\mu$ and $(-)\epsilon$. The frequency of $(-)\mu$ obtained from equation (1) i.e. the magnetic resonance frequency, ω_{m0} , is slightly lower for the straight- C_3 structure than for the curved- C_3 one. The same tendency is observed with a single ring resonator, provided by its

circular or square loop [58]. The inductance in each resonator is provided by its triangular metallic loop (equation (3)), while the capacitance is given by the overlap of the arm (equation (4)). It is also important to state the loss in the mentioned NIR bands as well. Low losses appear during the double negative NIR for both cases where the imaginary part of the index of refraction is very low, close to 0.

4.2. Isotropic orientation relative to the EM field

The orientations of the structure are relative to the electromagnetic (EM) field propagation direction and polarization [23, 58, 65], resulting in transmission and reflection properties as well as other material parameters of the structure. The best way to arrange the conventional SRR-wire metamaterial [12, 66] is to have the incident wave propagate through the plane of the structure; therefore, the $\mathbf{H}$ and $\mathbf{E}$ fields are normal and along the plane, respectively. To meet the necessary conditions to generate an NIR band, discussed in section 3, the directions of the fields in this study are set to be the same as those of the conventional metamaterials. These C_n structures have bi-isotropic properties on the structure plane. Hence, the transmission properties are also related to the placement of the structure on the plane [23].

4.2.1. Symmetry part and optimized placement. The C_3 unit is divided into three symmetry parts as illustrated in figure 10. The angle between 1 and 2, 2 and 3 and 3 and 1 is 120° . The dotted lines make a 90° angle with the $H2$ arms, demonstrating the mirror planes of the unit. These lines are called the mirror line of the unit. Six different placements of the C_3 unit, rotating from 0° to 120° to complete the symmetry part, will be studied. The directions of $\mathbf{k}$, $\mathbf{E}$ and $\mathbf{H}$ are shown in figures 10 and 11.

The six placements consist of angular orientations of (a) 0° , (b) 12° , (c) 42° , (d) 83° , (e) 95° and (f) 120° . The 0° and 120° positions are in fact the same placement where

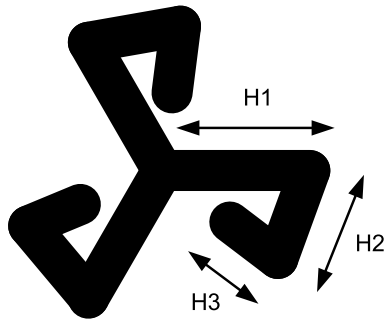


Figure 20. C_3 with the main axis, $H1$, the original arm, $H2$ and the extra arm $H3$.

Table 1. Negative index refractive passband of the C_3 unit with six different placements.

Angle (deg)	Double negative NIR bands (where loss factor < 1)
0	13.96–14.34, 15.06–15.99
12	13.90–14.76, 15.50–15.97
42	14.81–15.00, 15.20–15.50
83	13.96–14.36, 15.06–15.99
95	15.21–15.95
120	13.96–14.36, 15.06–15.99

one of the reference $H1$ arms is parallel to the direction of propagation at 0° ; the unit is then rotated counter clockwise and completes one symmetry division at 120° . The 83° rotation can be grouped with the 0° and 120° ones as well, due to their reciprocal placement. This will be further discussed in section 4.2.3. The 12° rotation takes place when one of the mirror lines is normal to $\mathbf{k}$. $\mathbf{k}$ is parallel to the mirror line in the 42° case and slightly shifted in the 95° case.

Figure 12 illustrates the S parameters, the real parts of the refraction index (n), the permittivity (ϵ), the permeability (μ) and the loss factor of the six cases. The unit is designed to generate a NIR at 15 GHz. As previously discussed, the single negative NIR band of the negative phase velocity can occur under the condition, discussed in [8]. However, when losses are taken into consideration, the double negative NIR is more preferable due to its lower loss factor, as the imaginary parts of the permittivity and permeability are not required to be large. Therefore, the NIR band which will be mentioned later in this paper is the one from the double negative NIR where its loss factor is less than 1.

The double negative NIR passbands of the six placements are formed from 14 to 16 GHz, presented in figure 3(b). The results of 0° , 120° and 83° are identical, presenting the band from 13.96 to 14.36, 15.06 to 15.99 GHz. The 42° and 95° rotations have similar transmission properties as seen from the S_{21} plot in figure 12(a); however, their effective parameters ϵ and μ are different, causing the different results of n . It should be stated that the effective parameters should always be retrieved to verify whether the transmission peak is left-handed or right-handed. The double negative NIR band in the 12° position takes place significantly due to its strong magnetic response as shown in the dip of the negative permeability at 15.5 GHz in figure 12(d). The loss factor plot is presented in

Table 2. Negative index refractive passband of the C_3 unit with five different placements.

Angle (deg)	NIR bands (where loss factor < 1)
5	13.90–14.93, 15.46–15.97
10	13.94–14.81, 15.52–16.09
12	13.90–14.76, 15.50–15.97
14	13.67–14.68, 15.52–16.09
18	13.81–14.62, 15.38–16.03

Table 3. Negative index refractive passband of the C_3 unit with five different placements.

Angle (deg)	NIR bands (where loss factor < 1)
65 and 18	13.81–14.62, 15.38–16.03
69 and 14	13.67–14.68, 15.52–16.09
71 and 12	13.90–14.76, 15.50–15.97
73 and 10	13.94–14.81, 15.52–16.09
78 and 5	13.90–14.93, 15.46–15.97

figure 12(e) and the NIR bands of the six units where the loss factor is less than 1 are concluded in table 1. Although it can be seen that the good quality of the double negative NIR bands is associated with the placement of the C_3 unit, the appearance of the NIR band in all cases (which completes the symmetry part) supports the isotropic aspect of the C_n structure. Still, the C_3 unit with the direction of propagation normal to the mirror line appears to be the most promising in terms of generating the double negative NIR.

4.2.2. Angle variation around the potential placement. In this section, the NIR band of the C_3 unit is studied where the unit is rotated in a small angle around the location of interest at 12° . Five placements, 5° , 10° , 12° , 14° , and 18° are observed as presented in figure 13.

The transmission coefficient, the real part of the refraction index (n), the permittivity (ϵ), the permeability (μ) and the loss factor of the five cases are shown in figure 14. The 10° and 14° can be considered to be reciprocal by rotating the unit around the mirror line. The 5° and 18° are close to displaying mutual properties as well; only 1° is shifted, while in the 12° case, the mirror line is right at the rotating axis.

During the 13° movement interval (5° – 18°) of the C_3 unit, the real part of μ has similar values. The real parts of ϵ are also alike except that of the 5° rotation, which is flipped relative to the x axis. Moreover, the index of refraction of the 5° , 10° and 12° and those of the 14° and 18° are roughly symmetrical with respect to the y axis. These could be due to the handedness of the medium. The handedness of a chiral medium influences the rotation of the polarization direction of the EM wave propagating through it, as well as the transmission and reflection properties [38]. Table 2 presents the NIR bands of the five units where the loss factor is less than 1.

4.2.3. Reciprocal placement. Section 4.2.2 mentions the reciprocal placement of the 10° and 14° units, where the unit can be rotated around the mirror line; the same behavior is

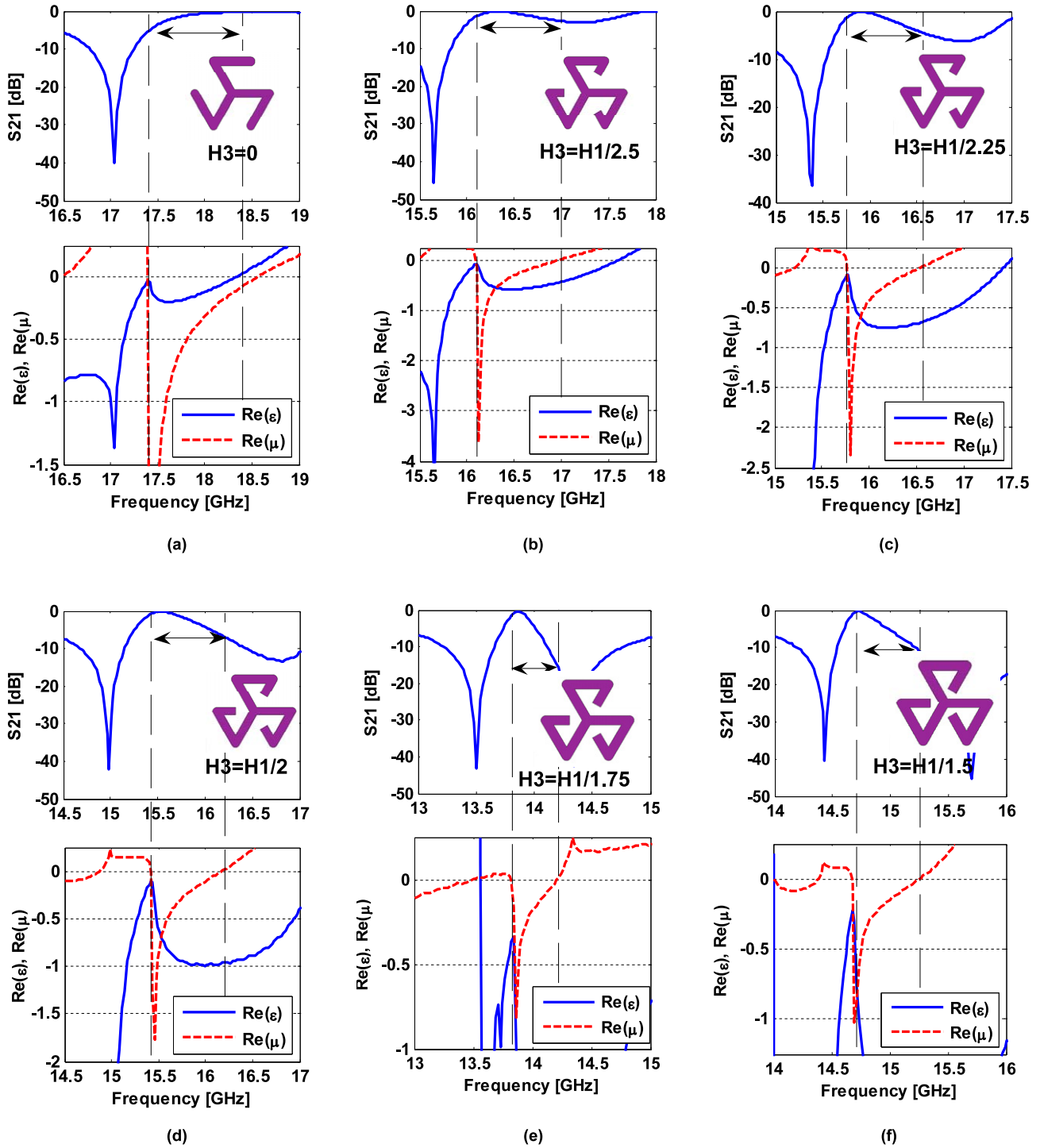


Figure 21. Structure designed from the C_3 group with the extra $H3$ when $H3 =$ (a) 0, (b) $(H1)/2.5$, (c) $(H1)/2.25$, (d) $(H1)/2$, (e) $(H1)/1.75$ and (f) $(H1)/1.5$ and their S_{21} parameter and the real part of the permittivity and permeability.

found when the unit is flipped over. Five reciprocal pairs, $65^\circ-18^\circ$, $69^\circ-14^\circ$, $71^\circ-12^\circ$, $73^\circ-10^\circ$ and $78^\circ-5^\circ$, are presented in figure 15. The NIR bands are listed in table 3.

Many research groups [53, 67, 68] have proposed several potential two- and three-dimensional (2D and 3D) isotropic metamaterials. In fact, regarding their isotropy claim, as illustrated in figures 16(a) and (c), the structures provide only 4 and 6 directions, for 2D and 3D models, respectively.

(Note that characteristically, a sphere is the pure 3D isotropic structure, while a circle is the one for the 2D structure.) On the other hand, with more degrees of freedom, the C_n structure with ' n ' arms can simply produce isotropic behavior in $2n$ directions for 2D and $6n$ directions for 3D. An example of the isotropic behavior of the C_3 structure (2D) is shown in figure 16(b). The arrow shows the direction of propagation that can induce the structure to generate the same results.

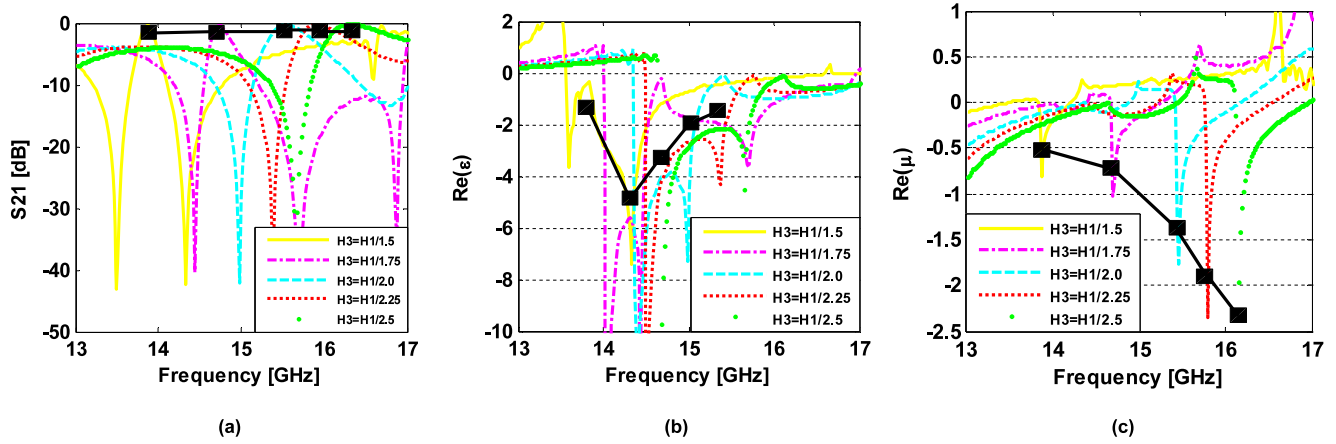


Figure 22. Comparison of the S_{21} parameter and the effective parameters of the C_3 units when the extra arm $H3$ is varied. (a) S_{21} and the real parts of the (b) permittivity and (c) permeability.

4.3. Capacitance and inductance modification versus location of effective parameters

Capacitance and inductance play a significant role in metamaterial design. Extra capacitances can be added to adjust the location of the effective material parameters [50, 69]. The location of the parameters will later control the passband of the design. This idea can improve the size of the structure.

4.3.1. Structure size: $H2/H1$ ratio. Figure 17 presents C_3 structures with different ratios of the arm ($H2$) and the main axis ($H1$), $H2:H1$. Figures 17(a)–(e) presents the case when $\mathbf{k}$ is parallel to the mirror line and figures 17(f)–(j) presents the case when $\mathbf{k}$ is perpendicular to the mirror line. In both cases, the length of $H2$ controls the capacitance of the system. The magnetic resonance frequency, ω_{m0} , calculated from equation (2) is also shown. It can be seen that with the smaller ratio value, where the capacitance is reduced, the resonance occurs at higher frequency. Therefore, the last two options, where $H2:H1$ are 0.75 and 0.5, could be eliminated since they cannot satisfy the homogeneous condition of metamaterials i.e. the size of the structure should be smaller than the operating wavelength.

Figures 18 and 19 show the effective parameters of the C_3 units where the direction of propagation, $\mathbf{k}$, is parallel and perpendicular to the mirror line, respectively.

For both cases, the locations of $-\epsilon$ and $-\mu$ move down to a lower frequency when the ratio of $H2:H1$ increases. The tendency of the behavior can be seen by the connected solid squares. This supports the capacitance adjustment concept.

4.3.2. Extra arm: $H3$. The other well-situated way to optimize the capacitance and inductance is to add an extra arm, presented as $H3$ in figure 20. This extra arm will significantly increase the inductance (equation (3)) and the extra capacitance will also be added. The higher capacitance and inductance will lower the location of the NIR band; therefore, the lower frequency can be operated with the same lattice constant, a , (structure dimension). This technique will certainly help the

metamaterial condition that requires $a \ll \lambda$, where λ is the operating wavelength.

Figure 21 presents the C_3 group with an extra arm, $H3$, with a different length, varying from 0 to $2/3$ of $H1$. The length of the extra arm is proportional to the main axis $H1$ where the main axis, $H1$, and the extra arm, $H2$, are fixed to have the same length. The S_{21} parameter and the real parts of the permittivity and permeability of each unit are also shown.

The location of the overlap of $-\epsilon$ and $-\mu$ is associated with the extra arm added to the structure unit. Higher values of capacitance and inductance cause the position of the double negative NIR band to be at a lower frequency. A comparison of the S_{21} parameter, the real part of ϵ and μ of the C_3 units is illustrated in figure 22.

5. Conclusions

A new design of left-handed chiral isotropic metamaterials which consists of arrays of a sole structure, designed using the C_n point group, is proposed. The C_n point group is selected, based on its chiral and isotropic properties. The main axis and the arm of the structure provide flexibility to the design. Our analytical studies have shown that the number of arms, n , and its orientation can effectively control the chirality index. A circuit analysis model is obtained in order to tune up the double negative NIR passband. Several significant parameters are studied to pursue the optimization of the candidates. Structure modification based on the capacitance and inductance value extensively influences the locations of the structure's effective material parameters and therefore has a strong impact on the double negative NIR passband. The proposed designs obtain a rank of isotropy as high as possible, but are still compromised to ease the fabrication. The C_n structures offer the most conceivable isotropic property in the $2n$ and $6n$ directions for two- and three-dimensional models. The negative index of refraction is also validated. These designs are additional promising candidates for chiral isotropic left-handed metamaterials and will most likely facilitate the investigation of the feasibility of the use of these metamaterials in different applications.

Acknowledgments

We would like to thank Dr John Derov from the Air Force Research Lab (AFRL), Dr Alkim Akyurtlu and Dr Kenneth A Marx from the University of Massachusetts Lowell, USA, and Dr Wanlop Surakampontorn from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand, for their guidance. This work was supported in part by the Thailand Research Fund (TRF) and the Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Thailand.

References

- [1] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J and Stewart W J 1999 Magnetism from conductors, and enhanced non-linear phenomena *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **47** 2075–84
- [2] Kshetrimayum R S 2005 A brief intro to metamaterials *IEEE Potentials* **23** 44–6
- [3] Jakšić Z, Dalarsson N and Maksimović M 2006 Negative refractive index metamaterials: principles and applications *Microw. Rev.* **12** 36–49
- [4] Rahmat-Samii Y 2006 Metamaterials in antenna applications: classifications, designs and applications 2006 *IEEE Int. Workshop on Antenna Technology Small Antennas and Novel Metamaterials* pp 1–4
- [5] Pendry S J 2007 Metamaterials and the control of electromagnetic fields *Conf. on Coherence and Quantum Optics (OSA Technical Digest (CD))* (Rochester, NY: Optical Society of America) paper CMB2
- [6] Veselago V G 1968 Electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ *Sov. Phys.—Usp.* **10** 509–14
- [7] McCall M W, Lakhtakia A and Weiglhofer W S 2002 The negative index of refraction demystified *Eur. J. Phys.* **23** 353–9
- [8] Depine R A and Lakhtakia A 2004 A new condition to identify isotropic dielectric–magnetic materials displaying negative phase velocity *Microw. Opt. Technol. Lett.* **41** 315–6
- [9] Markos P and Soukoulis C M 2003 Transmission properties and effective electromagnetic parameters of double negative metamaterials *Opt. Express* **11** 649–61
- [10] Varadan V V and Ruyen R 2006 Analyticity, causality, energy conservation and the sign of the imaginary part of the permittivity and permeability *IEEE Antennas and Propagation Society Int. Symp. Digest*
- [11] Markel V A 2008 Can the imaginary part of permeability be negative *Phys. Rev. E* **78** 026608
- [12] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, Nemat-Nasser S C and Schultz S 2000 Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184–7
- [13] Marqués R, Medina F and Rafii-El-Idrissi R 2002 Role of bianisotropy in negative permeability and left-handed metamaterials *Phys. Rev. B* **65** 1–6
- [14] Engheta N and Saadun M M I 1991 Novel pseudochiral or Ω medium and its application *PIERS: Proc. Progr. Electromag. Res. Symp. (Cambridge, MA, July 1991)*
- [15] Tretyakov S A, Simovski C R and Hudlíčka M 2007 Bianisotropic route to the realization and matching of backward-wave metamaterial slabs *Phys. Rev. B* **75** 153104
- [16] Gokkavas M, Guven K, Bulu I, Aydin K, Penciu R S, Kafesaki M, Soukoulis C M and Ozbay E 2006 Experimental demonstration of a left-handed metamaterial operating at 100 GHz *Phys. Rev. B* **73** 193103
- [17] Gay-Balmaz P and Martin O J F 2002 Efficient isotropic magnetic resonators *Appl. Phys. Lett.* **81** 939–41
- [18] Baena J D, Jelinek L and Marqués R 2007 Towards a systematic design of isotropic bulk magnetic metamaterials using the cubic point groups of symmetry *Phys. Rev. B* **76** 245115
- [19] Chen H, Ran L, Huangfu J, Zhang X, Chen K, Grzegorzczak T M and Kong J A 2004 Left-handed metamaterials composed of only S-shaped resonators *Phys. Rev. E* **70** 057605
- [20] Wongkasem N, Akyurtlu A, Marx K A, Dong Q, Li J and Goodhue W D 2007 Development of chiral negative refractive index metamaterials for the terahertz frequency regime *IEEE Trans. Antennas Propag.* **55** 3052–62
- [21] Zhang W, Papakostas A, Potts A, Bagnall D and Zheludev N 2004 Planar chiral metamaterials and their application to optoelectronics devices *Nano and Giga Challenges in Microelectronics (Cracow, September 2004)*
- [22] Potts A, Papakostas A, Zheludev N I, Coles H J, Greef R and Bagnall D M 2003 Planar chiral meta-materials for photonic devices *J. Mater. Sci., Mater. Electron.* **14** 393–5
- [23] Papakostas A, Potts A, Bagnall D M, Prosvirnin S L, Coles H J and Zheludev N I 2003 Optical manifestations of planar chirality *Phys. Rev. Lett.* **90** 107404
- [24] Potts A, Papakostas A, Bagnall D M and Zheludev N I 2004 Planar chiral meta-materials for optical applications *Microelectron. Eng.* **73/74** 367–71
- [25] Rogacheva A V, Fedotov V A, Schwanecke A S and Zheludev N I 2006 Giant gyrotropy due to electromagnetic-field coupling in a bilayered chiral structure *Phys. Rev. Lett.* **97** 177401
- [26] Plum E, Zhou J, Dong J, Fedotov V A, Koschny T, Soukoulis C M and Zheludev N I 2009 Metamaterial with negative index due to chirality *Phys. Rev. B* **79** 035407
- [27] Plum E, Fedotov V A, Schwanecke A S, Zheludev N I and Chen Y 2007 Giant optical gyrotropy due to electromagnetic coupling *Appl. Phys. Lett.* **90** 223113
- [28] Plum E, Fedotov V A and Zheludev N I 2008 Optical activity in extrinsically chiral metamaterial *Appl. Phys. Lett.* **93** 191911
- [29] Plum E, Liu X-X, Fedotov V A, Chen Y, Tsai D P and Zheludev N I 2009 Metamaterials: optical activity without chirality *Phys. Rev. Lett.* **102** 113902
- [30] Fedotov V A, Schwanecke A S, Zheludev N I, Khardikov V V and Prosvirnin S L 2007 Asymmetric transmission of light and enantiomerically sensitive plasmon resonance in planar chiral nanostructures *Nano Lett.* **7** 1996–9
- [31] Schwanecke A S, Fedotov V A, Khardikov V V, Prosvirnin S L, Chen Y and Zheludev N I 2008 Nanostructured metal film with asymmetric optical transmission *Nano Lett.* **8** 2940–3
- [32] Plum E, Fedotov V A and Zheludev N I 2009 Planar metamaterial with transmission and reflection that depend on the direction of incidence *Appl. Phys. Lett.* **94** 131901
- [33] Fedotov V A, Mladyonov P L, Prosvirnin S L, Rogacheva A V, Chen Y and Zheludev N I 2006 Asymmetric propagation of electromagnetic waves through a planar chiral structure *Phys. Rev. Lett.* **97** 167401
- [34] Tretyakov S, Nefedov I, Sihvola A, Maslovski S and Simovski C 2003 Waves and energy in chiral nihility *J. Electromagn. Waves Appl.* **17** 695–706
- [35] Qiu C-W, Burokur N, Zouhd S and Li L-W 2008 Chiral nihility effects on energy flow in chiral materials *J. Opt. Soc. Am. A* **25** 55–63
- [36] Baev A, Samoc M, Prasad P N, Krykunov M and Autschbach J 2007 A quantum chemical approach to the design of chiral negative index materials *Opt. Express* **15** 5730
- [37] Pendry J B 2004 A chiral route to negative refraction *Science* **306** 1353–5
- [38] Sabah C 2008 Left-handed chiral metamaterials *Cent. Eur. J. Phys.* **6** 872–8

- [39] Ro R, Varadan V V and Varadan V K 1992 Electromagnetic activity and absorption in microwave chiral composites *IEEE Proc.* **H 139** 441–8
- [40] Matra K and Wongkasem N 2008 Novel chiral isotropic metamaterials *TISD 2008: Technology and Innovation for Sustainable Development Conf. (Thailand, January 2008)* pp 403–7
- [41] Zabrodsky H and Avnir D 1995 Continuous symmetry measures, IV: chirality *J. Am. Chem. Soc.* **117** 462–73
- [42] Potts A, Bagnall D M and Zheludev N I 2004 A new model of geometric chirality for two-dimensional continuous media and planar meta-materials *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **6** 193–203
- [43] Chen X, Grzegorzczak T M, Wu B-I, Pacheco J and Kong J A 2004 Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials *Phys. Rev. E* **70** 016608
- [44] Lucarini V, Saarinen J J, Peiponen K-E and Vartiainen E M 2005 *Kramers–Kronig Relations in Optical Materials Research (Springer Series in Optical Sciences)* (Berlin: Springer)
- [45] Sihvola A 1999 *Electromagnetic Mixing Formulas and Applications* (Cornwall: T J International)
- [46] Lindell I V, Sihvola A H, Tretyakov S A and Viitanen A J 1994 *Electromagnetic Waves in Chiral and Bi-Isotropic Media* (Boston, MA: Artech House Publishers)
- [47] Wongkasem N 2008 Analysis and categorization of nano-artificial magnetic metamaterials by group theory *KKU Research Report 2008 Thailand*
- [48] Padilla W J 2005 Group theoretical description of artificial magnetic metamaterials utilized for negative index refraction arXiv:cond-mat/0508307
- [49] Padilla W J 2007 Group theoretical description of artificial electromagnetic metamaterials *Opt. Express* **15** 1639
- [50] Wongkasem N, Akyurtlu A and Marx K A 2006 Group theory based design of isotropic negative refractive index metamaterials *PIER* vol 63, pp 295–310
- [51] Wongkasem N, Akyurtlu A and Marx K A 2007 Identification and classification of chiral and bi-anisotropic metamaterials by group theory *URSI National Radio Science Mtg (Ottawa, 2007)*
- [52] Wongkasem N, Akyurtlu A, Marx K A, Goodhue W D, Li J, Dong Q and Ada E 2007 Lithographic fabrication of a novel micron scale metamaterials structures-based chiral metamaterial: theoretical experimental and analysis of its Y-chiral and negative index of refraction properties in the terahertz and microwave regime *Microsc. Res. Tech.* **70** 497–505
- [53] Baena J D, Jelinek L, Marqués R and Zehentner J 2006 Electrically small isotropic three-dimensional magnetic resonators for metamaterial design *Appl. Phys. Lett.* **88** 134108
- [54] Zabrodsky H, Peleg S and Avnir D 1995 Symmetry as a continuous feature *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **17** 1154–66
- [55] Chen H, Ran L-X, Jiang Tao H-F, Zhang X-M, Cheng K-S, Grzegorzczak T M and Kong J A 2005 Magnetic properties of S-shaped split-ring resonators *PIER* vol 51, pp 231–47
- [56] Caloz C and Itoh T 2002 Application of the transmission line theory of left-handed (LH) materials to the realization of a microstrip ‘LH line’ *IEEE-APS Int. Symp. (San Antonio, TX, June 2002)* vol 2, pp 412–5
- [57] Lai A, Caloz C and Itoh T 2004 Composite right/left-handed transmission line metamaterials *IEEE Microw. Mag.* **9** 34–40
- [58] Kafesaki M, Koschny Th, Penciu R S, Gundogdu T F, Economou E N and Soukoulis C M 2005 Left-handed metamaterials: detailed numerical studies of the transmission properties *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **7** S12–22
- [59] Chen H, Ran L, Huangfu J, Zhang X, Chen K, Grzegorzczak T M and Kong J A 2004 Metamaterial exhibiting left-handed properties over multiple frequency bands *J. Appl. Phys.* **96** 5338–40
- [60] Graneau P 1985 *Ampere–Neumann Electrodynamics of Metals* (Nonantum: Hadronic)
- [61] Grover F W 1946 *Inductance Calculations—Working Formulas and Tables* (New York: Van Nostrand) p 248
- [62] Peoglos V 1988 Measurement of the magnetostatic force of a current circuit on a part of itself *J. Phys. D: Appl. Phys.* **21** 1055–61
- [63] Bueno M and Assis A K T 1997 Equivalence between the formulas for inductance calculation *Can. J. Phys.* **75** 357–62
- [64] Weir W B 1974 Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies *Proc. IEEE* **62** 33–6
- [65] Katsarakis N, Koschny T, Kafesaki M, Economou E N and Soukoulis C M 2004 Electric coupling to the magnetic resonance of split ring resonators *Appl. Phys. Lett.* **84** 2943–45
- [66] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J and Youngs I 1996 Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773–6
- [67] Marques R, Martel J, Mesa F and Medina F 2002 A new 2D isotropic left-handed metamaterial design: theory and experiment *Microw. Opt. Technol. Lett.* **35** 405–8
- [68] Koschny Th, Zhang L and Soukoulis C M 2005 Isotropic three-dimensional left-handed metamaterials *Phys. Rev. B* **71** 121103
- [69] Ziolkowski R W 2003 Design, fabrication, and testing of double negative metamaterials *IEEE Trans. Antennas Propag.* **51** 1516–29

Optimized Isotropy in Left-Handed Metamaterials

K. Matra^{*,1} and N. Wongkasem^{1,2,3}

¹Department of Electrical Engineering, Khon Kaen University
Khon Kaen, 40002, Thailand

²Electrical and Computer Engineering Department
University of Massachusetts, Lowell, MA 01854, USA

³Author to whom correspondence should be addressed: nantakan@kku.ac.th

Abstract

Left-handed metamaterials designed using C_n group with optimized isotropy are proposed. The structures provide $2n$ and $6n$ excitation directions where the identical response is generated for two and three dimensional models. Circuit analysis is used to design the negative index of refraction, later verified by the effective material parameters. The result shows the negative index passband with low losses.

Keywords: Isotropy, Negative Index of refraction, Left-handed, Backward wave, Metamaterials.

1. Introduction

Metamaterials are artificial electromagnetic materials designed to perform within a desired frequency. The size of the unit cell of its periodic structure must be very small comparative to the operating wavelength for obtaining homogenous properties. One of the most popular properties of metamaterials is the negative refractive index (NRI). Having these characteristics, the propagating wave, after passing through the material, blends on the opposite direction as compared to that of other natural materials. That is why this NRI material is sometimes called left-handed or backward metamaterial. These unique properties lead to its use in numerous applications, such as perfect lenses [1] and invisible objects [2], to name a few.

After Veselago assumed the existence of negative refractive index in electromagnetic (EM) materials in 1968 [3], several research groups have been taking an interest in this extra properties. The first metamaterial design consisted of arrays of rods and split ring resonators (SRR), where a real part of electric permittivity and magnetic permeability is negative in the same range is generated [4-6]. Unfortunately, due to its bi-anisotropy, the NRI band of these composites presents high losses. Furthermore, they are not convenient in terms of fabrication because of the combination of the two

structures. Hence, there were several proposals to design metamaterials which contain only one structure [7-9] that can generate NIR and low loss. However, to optimize the transmission properties of a designed structure, one may consider the isotropic property. Isotropic media contains only scalar parameters which made them independent of the direction of excitation. Structures with high rank of isotropic properties increase the degree of freedom in term of an excitation direction. This is beneficial for fixing the properties of the structure.

The first group who attempted to design a two dimensional isotropic metamaterial structure was P. Gay-Balmaz and O. Martin [10]. Later, there were several structures designed to have isotropy for both two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) structures, with additional features such as orientation improvement of SRR in the metamaterial composites to cancel the bi-anisotropy, cubic SRRs, crystal-like structures, and random arrangements of chiral particles [11]. However, these concepts, still, do not actually lead to structures with a high degree of isotropy. Most of these conventional isotropic metamaterials in 2D and 3D present isotropic properties in only 4 and 6 directions respectively.

In this paper, we propose a new design of isotropic left-handed metamaterials which consist of only a single structure. Therefore, these structures are optimized to obtain a rank of isotropy as high as possible, but still compromised to ease the fabrication. Study of isotropy behavior of the structure placements is the aim of this paper. Group theory and circuit analysis [8-9, 12-13] are used to obtain the isotropic and NIR properties. CST Microwave Studio® software together with Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method are used to study the transmission and reflection properties which later will be used to extract [14] the effective material parameters and index of refraction of the designs. The complex values of the parameters are double-checked using Kramers-Kronig relations [15].

2. Structures Design

Our goal of this paper is to design metamaterial structures which contain chirality and negative refractive index with the highest rank of isotropy. The C_n point group, as shown in figure 1, is chosen to be our structure. From group theory, we find that C_n structures are classified as bi-anisotropic. They contain chiral and co-polarization terms; however, when wave polarization is taken into account [16], it has been found that all of the parameters in x-x, x-y, y-x and y-y plane are identical. Therefore, we can conclude that the C_n structures have isotropic properties in the plane of their structure. Then, circuit analysis is used to predict the location of NRI band [7]. We have found that the structures in this group can produce NRI i.e. both the capacitance and inductance of the unit cell influence the magnetic resonance of the structure. More details of the NRI methodology are presented in [9].

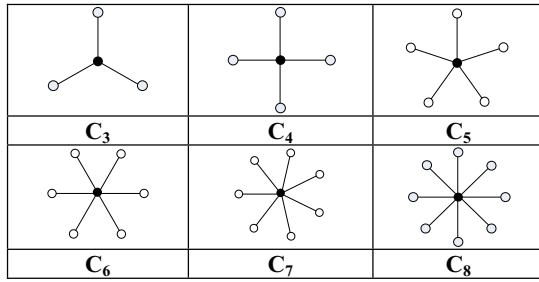


Figure 1. C_n point group

3. Optimized Isotropic structure

In this part, isotropy in our designed structures is discussed. Isotropy is the property that shows the independence of the direction. This is beneficial for several applications. Many research groups have tried to design metamaterials with isotropic properties [10-11]. However, their structures present isotropy for only 4 directions and 6 directions in two-dimensional and three-dimensional model respectively, as illustrated in figure 2. Since it has been shown that the C_3 structure can present chiral and NRI properties [9], we have chosen it to be our case study. We will focus on the effect of isotropy on the C_3 structure regarding to the structure arrangement.

The C_3 structures are designed to operate in 15 GHz based on the H2/H1 ratio [9]. CST Microwave Studio® software and Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method is used to determine the effective material parameters. The index of

refraction of the designs is extracted from S_{21} and S_{11} parameters using the Robust method.

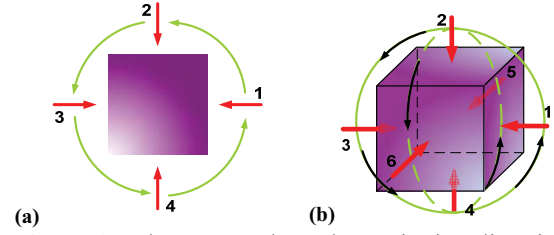


Figure 2. The arrows show the excitation direction which present isotropy in conventional isotropic structure in (a) 2D and (b) 3D

In simulation, PEC and PMC boundary is set at the planes which are normal to the $\mathbf{E}$ field and $\mathbf{H}$ field directions, respectively, to form a periodic structure. The structure is made of copper. The dimensions are as follows: linewidth, $w = 0.85$ mm, main axis, $H1 = 3.83$ mm, arm, $H2 = 5.1$ mm, structure thickness, $t = 0.0112$ mm. The distance between the two structures is $d = 3.175$ mm.

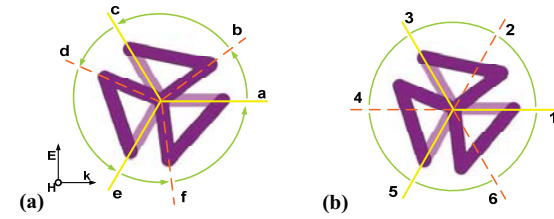


Figure 3. (a) Six reciprocal placements and (b) Six symmetry parts of the C_3 pair unit with respect to the directions of propagation ($\mathbf{k}$) and fields ($\mathbf{E}$ and $\mathbf{H}$)

The study the isotropic property of C_n structures is divided into 2 parts: first, a reciprocal placement, and second, a symmetry part. In the first part, the six placements of the C_3 structure, consisting of an angular orientation from 0 to 360 degrees: 0° ($a \rightarrow a$), 83° ($f \rightarrow a$), 120° ($e \rightarrow a$), 203° ($d \rightarrow a$), 240° ($c \rightarrow a$), and 323° ($b \rightarrow a$) as shown in figure 3(a), are considered. The angle is measured from the reference line (line 1) to the other lines. The solid and dash lines present a reciprocal placement of the structure. Therefore, when the EM field interacts with the structure in these directions, the same response is observed. Figure 4 illustrate the S parameters, real parts of permittivity (ϵ), permeability (μ) and the refraction index (n) of the six reciprocal placements.

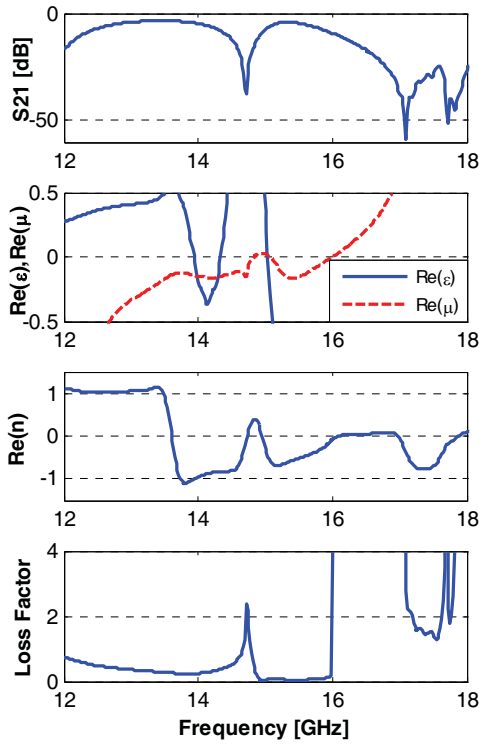


Figure 4. S_{21} parameter, real part of effective parameters; permittivity (ϵ), permeability (μ), index of refraction (n) and loss factor of six reciprocal placements.

As mentioned before, the results of these six placements are identical because they have reciprocal locations (H1 parallel to $\mathbf{k}$), presenting the NRI bands which have a loss factor less than 1 from 13.96 to 14.36, 15.06 to 15.99 GHz.

Considering figure 3(b) showing the symmetry behavior of the structure, the structure has 6 directions which provide an identical result and isotropic properties as shown in figure 4. Note that here, only the placement of the structure which shows isotropic properties is considered. The structure is not placed yet in an optimal angle. It has been found that at 11.5° , the C_3 structure produces an optimized NRI result.

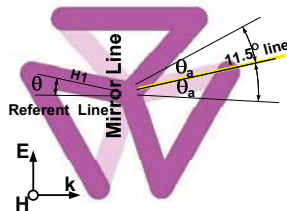


Figure 5. Optimized placement (11.5°) and angle variation around the potential placement

After getting the optimized placement (11.5°), we have studied six angles around the 11.5° line (θ_a); $\pm 2.5^\circ$, $\pm 6.5^\circ$ and $\pm 11.5^\circ$, which are 0° , 5° , 9° , 14° , 18° and 23° . The angles are comparative to the reference line (θ) to confirm the isotropic properties of the structures. They were divided into two groups: counterclockwise (14° , 18° and 23°) and clockwise (0° , 5° and 9°). The pair of 9° and 14° , 5° and 18° , and 0° and 23° can be considered to be reciprocal by rotating the unit around the 11.5° line as shown in figure 5.

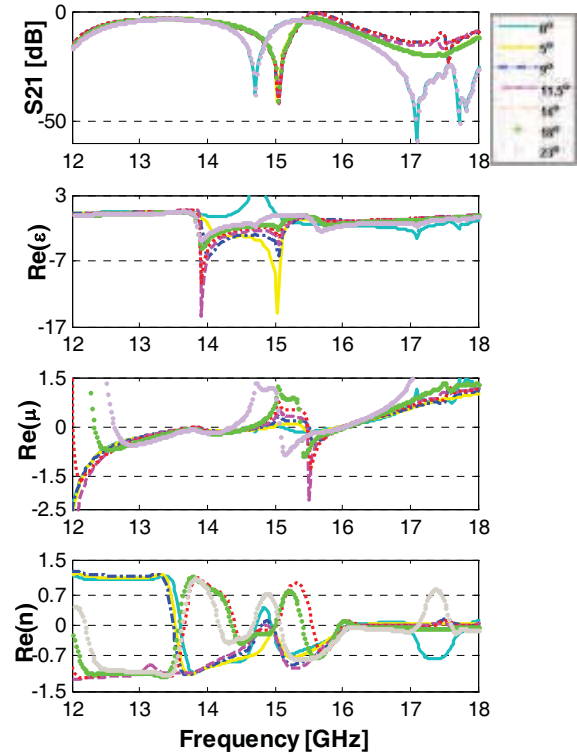


Figure 6. The S_{21} parameter and the real part of effective parameters; permittivity (ϵ), permeability (μ) and index of refraction (n) around $\theta = 11.5^\circ$

From the results presented in figure 6, we can observe that structures oriented with an angle in a range of 6.5° from the 11.5° line i.e. when $\theta = 5^\circ$, 9° , 14° and 18° produce a similar value of S_{21} . These results present a chiral effect ensuing in n and ϵ values i.e. the opposite direction between counterclockwise and clockwise group. This can be due to the handedness of the medium, which influences the rotation of polarization direction of EM wave propagating through it, as well as the transmission and reflection properties [17]. While $\theta = 0^\circ$ and 23° have different results, they still show the same trend as the other angles.

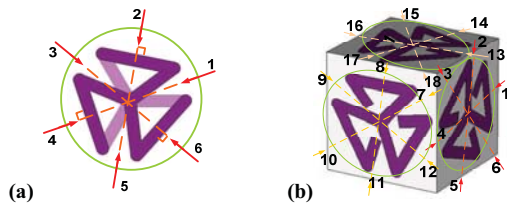


Figure 7. The arrows shown the excitation direction which present isotropy in C_3 structure in (a) 2D and (b) 3D

The results of the arrangement of C_3 structures in different angles are well-founded reasons for supporting isotropic properties in C_n structures. The results of reciprocal form arrangements (when at least one leg of H1 is oriented in the same direction) also give an identical value. Therefore C_n group can present isotropy $2n$ directions in 2D and $6n$ directions in 3D which are more than those from other conventional isotropic structures. An example of the isotropic C_3 structures in 2-D and 3-D is shown in figure 7. In addition, when the structures are rotated in a small angle around the optimal placement ($\pm 6.5^\circ$), the results are still alike. Note that the direction of rotation influences the effective parameters because of the handedness of the structures.

4. Conclusion

New designs of left-handed metamaterials, where the isotropy is optimized, are studied. The C_n structures offer the most possible isotropic property in $2n$ and $6n$ directions for two- and three-dimensional models. The negative index of refraction is also verified. These designs are additional promising candidates for isotropic left-handed metamaterials.

Acknowledgments

This work was supported in part by the Thailand Research Fund (TRF), Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, and Graduate School of Khon Kaen University, Thailand.

References

- [1] J. B. Pendry, "Negative refraction makes a perfect lens", *Phys. Rev. Lett.* **85**, pp.3966-3969. October 2000.
- [2] D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr, and D. R. Smith, "Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies", *Science* **314**, p.977-980, November 2006.
- [3] V. G. Veselago, "Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of ϵ and μ ", *Soviet Physics Uspekhi* **10**(4), pp. 509-514. 1968.
- [4] J. B. Pendry, A. J. Holden, W. J. Stewart, and I. Youngs, "Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures", *Phys. Rev. Lett.* **76**, pp.4773-4776, June 1996.
- [5] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, "Magnetism from Conductors and Enhanced Linear Media." *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **47**(11), pp. 2075-2084, November 1999.
- [6] D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S.C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity", *Phys. Rev. Lett.* **84**, pp. 4184-4187, May 2000.
- [7] H. Chen, L.-X. Ran, H.-F. Jiang Tao, X.-M. Zhang, K.-S. Cheng, T.M. Grzegorzczuk, and J. A. Kong, "Left-handed material composed of only S-shaped resonators", *Phys. Rev. E*, **70**(5), 057605, November 2004.
- [8] N. Wongkasem, A. Akyurtlu, K. A. Marx, Q. Dong, J. Li, and W.D. Goodhue, "Development of chiral negative refractive index metamaterials for the terahertz frequency regime", *IEEE Trans Antenn Propag.* **55**, pp. 3052-3062. November 2007.
- [9] K. Matra and N. Wongkasem, "Left-handed chiral isotropic metamaterials: analytical and detailed numerical studies", *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **11**, pp.074011 (1-15) March 2009.
- [10] P. Gay-Balmaz, O. J. F. and Martin, "Efficient isotropic magnetic resonator", *Appl. Phys. Lett.* **81**(5), 939-941, 2002.
- [11] J. D. Baena, L. Jelinek, and R. Marqu es, "Towards a systematic design of isotropic bulk magnetic metamaterials using the cubic point groups of symmetry", *J. Appl. Phys.* **76**, p.245115(1-23), 2007.
- [12] K. Matra and N. Wongkasem, "Novel Chiral Isotropic Metamaterials", *Technology and Innovation for Sustainable Development Conference*, pp.403-407. January 2008.
- [13] W. J. Padilla, Group theoretical description of artificial electromagnetic metamaterials, *Optics Express* **15**, p.1639, 2007.
- [14] X. Chen, T. M. Grzegorzczuk, B.-I. Wu, J. Pacheco, and J. A. Kong, "Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials", *Phys. Rev. E* **70**, p.016608, 2004.
- [15] V. Lucarini, J.J. Saarinen, K.-E. Peiponen, and E.M. Vartiainen: **Kramers-Kronig Relations in Optical Materials Research**, *Springer Series in Optical Sciences*, Springer, Berlin, 2005.
- [16] N. Wongkasem, "Analysis and categorization of nano-artificial magnetic metamaterials by group theory", **KKU Research Report 2008**. (in press).
- [17] C. Sabah, "Left-handed chiral metamaterials" *Cent. Eur. J. Phys.* **6**(4) 872-878, 2008.

Light splitting effects in chiral metamaterials

N Wongkasem^{1,2,3} and A Akyurtlu²

¹ Department of Electrical Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40002, Thailand

² Department of Electrical and Computer Engineering, University of Massachusetts, Lowell, MA 01854, USA

E-mail: nantakan@kku.ac.th

Received 20 October 2009, accepted for publication 23 November 2009

Published 20 January 2010

Online at stacks.iop.org/JOpt/12/035101

Abstract

Six states of splitting waves are observed when an electromagnetic wave propagates through wedge-shaped chiral metamaterials. The chirality and electromagnetic parameters, as well as the material parameter factor, are the main influences controlling the refractive indices of the material and the rotations of the out-going waves. The incidence angle or the angle of the wedge has a major impact on selecting the out-going waves and the occurrence of an evanescent wave. This new study discloses some of the less known aspects of chiral metamaterial design leading to a broader range of applications in optical devices.

Keywords: metamaterials, chiral, negative refractive index

(Some figures in this article are in colour only in the electronic version)

1. Introduction

Two unique electromagnetic features of chiral media are the optical activity or optical rotary dispersion (ORD), which creates the rotation of the polarization plane, and the circular dichroism (CD), where the differential absorption of left and right circularly polarized light is observed. Due to the optical activity, as an arbitrary polarized plane wave is incident on chiral media, there will be two eigenmodes, left and right circularly polarized waves (LCP and RCP wave), propagating inside the media with different velocities. Hence, there are two refractive indices corresponding to the two eigenwaves. The difference causes the rotation of the plane of polarization. This effect is considered as a natural circular birefringence. It is similar, but not identical, to Faraday rotation in gyroelectric and gyromagnetic media [1, 2].

Optical activity can be naturally exhibited by many organic molecules e.g. DNA, sucrose, etc, solid materials such as quartz, topaz, beryl, as well as spin-polarized gases at optical frequencies [3, 4]. Recently, in connection with negative index metamaterials [5, 6], artificial chiral structures such as helices [7, 8], Gammadion [9–12], Y structure [13], chiral SRR [14] and Cn [15] have been designed to generate chirality

at microwave frequencies. In addition, there are several works in progress in optical regimes [16–18].

Four different states of the two eigenwaves propagating inside chiral metamaterials have been characterized [19, 20]. Typically, these LCP and RCP plane waves propagate without interfering with each other, according to their different phase velocities. A recent experimental investigation of the separation of left and right circularly polarized light normally incident on a chiral liquid has been reported [21]. However, as the two waves encounter any non-chiral boundaries, they are recombined and then present a reflected and transmitted wave from the chiral media [3]. In several studies where circularly polarized waves are launched as an excitation [12, 14, 18, 22–24], the same waves are considered for the whole system [25]; there are no splitting waves in the chiral medium, according to each circularly polarized incident wave. Consequently, the phase velocity, as well as the refractive index of each circularly polarized wave can be obtained. These refractive indices are not the effective index of chiral materials.

It is important to stress that the effective index of refraction, $n_{\text{eff}} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$, of chiral media is negative only when the material parameter factor, $\rho = \frac{\epsilon_r^R}{\epsilon_r^I} + \frac{\mu_r^R}{\mu_r^I}$ [20], is less than zero, i.e. n_L and n_R represent the indices of the two eigenmodes inside the media. However, if either n_L or n_R

³ Author to whom any correspondence should be addressed.

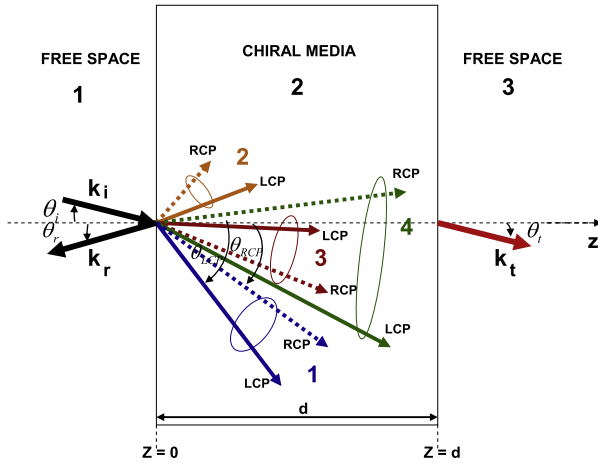


Figure 1. Wave directions of oblique incidence on a chiral slab.

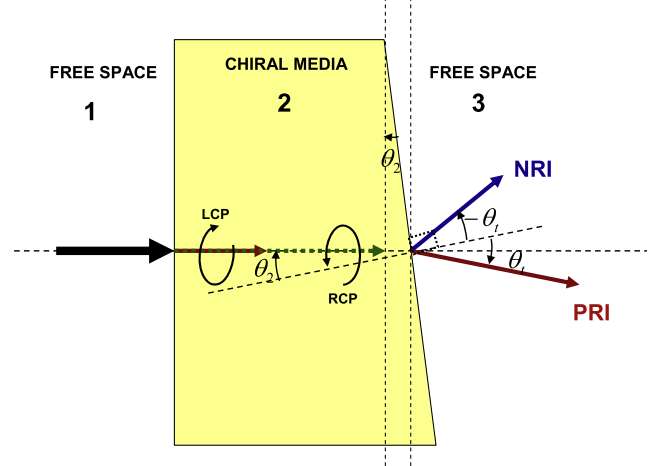


Figure 2. Propagating waves on a chiral wedge with a normally incident wave.

is negative and its absolute value is greater than the positive one, this can imply a negative refractive index (NRI) of the media as well, that is a wave with a larger index (absolute value) is dominant. Because there are actually three indices, any conclusion in terms of the indices needs to be considered carefully, especially in the case where a slab of chiral media is illuminated by a linearly polarized incident wave; therefore, the out-going wave is also linearly polarized or elliptically polarized in lossy media. For example, in [17], an extremely weak negative refractive transmitted wave was observed by using a linearly polarized plane wave as the excitation, when chirality nihility [5, 26, 27] was designed.

In order to verify that a linearly polarized wave splits into LCP and RCP waves, we suggest a wedge-shaped structure of chiral metamaterial to observe the two transmitted waves. The conditions when the out-going waves from a chiral metamaterial would grant either positive or negative refractive index properties will also be stressed. The rotations of the out-going waves are also discussed. The incident angle, or the angle of the wedge, plays a significant role in selecting the out-going waves. Several states of the splitting waves found in chiral metamaterials elevate propagation flexibility which will open new possibilities in optical devices.

2. Two circularly polarized waves in chiral metamaterials

Fields in a chiral material induce electric and magnetic dipole moments ($\mathbf{P}$ and $\mathbf{M}$) as shown in equation (1).

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad \vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M}. \quad (1)$$

These dipole moments, $\mathbf{P}$ and $\mathbf{M}$, proportional to $\nabla \times \vec{E}$ and $\nabla \times \vec{H}$, are used to describe the optical activity of chiral media. Constitutive relations and wavenumbers of the reciprocal chiral medium in Drude–Born–Fedorov form are given as [3, 28]

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r [\vec{E} + \kappa \nabla \times \vec{E}] \quad \vec{B} = \mu_0 \mu_r [\vec{H} + \kappa \nabla \times \vec{H}] \quad (2)$$

where $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$, $\mu = \mu_0 \mu_r$ and κ are the permittivity, permeability and chirality parameter of the chiral medium, respectively.

Chiral media can also be characterized in the frequency domain by Tellegen constitutive relations [29].

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} + (\chi - j\kappa) \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \vec{H} \\ \vec{B} &= \mu_0 \mu_r \vec{H} + (\chi + j\kappa) \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \vec{E}. \end{aligned} \quad (3)$$

Note that materials with a magnetoelectric Tellegen parameter $\chi = 0$ are reciprocal, and in fact this is the Pasteur medium.

When the chiral slab is illuminated by a linearly polarized wave, the transmitted wave on the other side of the slab will be elliptically polarized due to the chirality of the slab. Inside the slab, there are two circularly polarized waves, left and right circularly polarized light (LCP and RCP). The two waves can be described by left- and right-handed Beltrami fields [3]. The left- and right-handed fields propagate independently but are coupled at the boundaries. Nevertheless, $\mathbf{E}$ and $\mathbf{H}$ are united while propagating, but decoupled at the boundaries.

The wavenumbers and refractive indices of LCP and RCP waves can be calculated as follows:

$$\begin{aligned} \gamma_L &= k_0 (\sqrt{\epsilon_r \mu_r} + \kappa); & \gamma_R &= k_0 (\sqrt{\epsilon_r \mu_r} - \kappa) \\ n_L &= \sqrt{\epsilon_r \mu_r} + \kappa; & n_R &= \sqrt{\epsilon_r \mu_r} - \kappa \end{aligned} \quad (4)$$

where $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$; under the dissipative condition where ϵ , μ and κ are all complex valued, plane wave propagation with four different circular polarization states in the medium [19, 20], as shown in figure 1, is observed. Figure 2 presents a plane wave obliquely incident on a planar free space/chiral interface. The reference regime $\rho = \frac{\epsilon_r^R}{\epsilon_r^I} + \frac{\mu_r^R}{\mu_r^I}$ is set. With the condition $|\kappa^R| < (\sqrt{\epsilon_r \mu_r})^R$, both LCP and RCP waves are of a positive phase velocity (PPV) in case 1 and negative phase velocity (NPV) in case 2, for $\rho > 0$ and $\rho < 0$, respectively, while in cases 3 and 4 when $-\kappa^R > (\sqrt{\epsilon_r \mu_r})^R$ and $\kappa^R > (\sqrt{\epsilon_r \mu_r})^R$, the two circularly polarized states of light

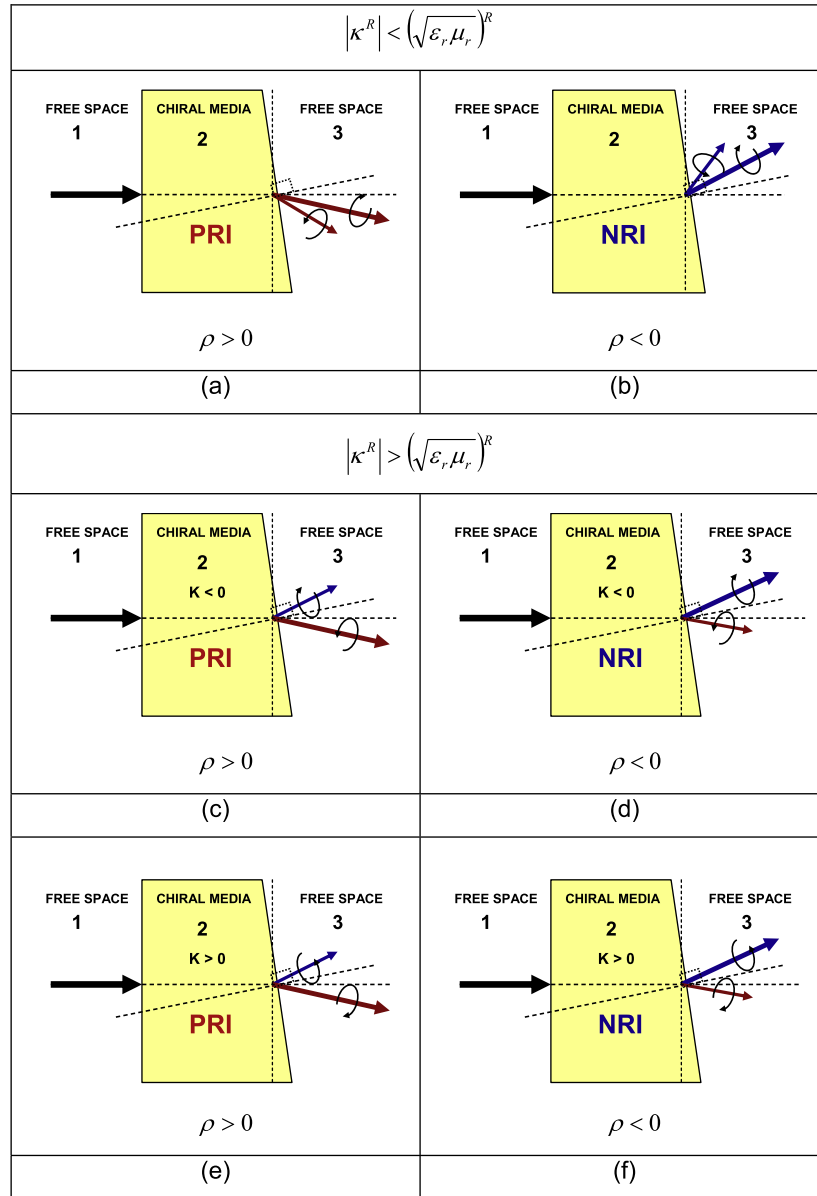


Figure 3. Transmitted waves split behind the chiral wedge.

generate NPV and PPV simultaneously. $()^R$ and $()^I$ signify the real and imaginary parts of any complex valued parameters. In these circumstances, the reference regime and the chirality parameter will be used to study the light splitting effects in chiral metamaterials.

3. Refractive indices and light splitting effects in chiral metamaterials

The refraction of light in isotropic chiral media also obeys Snell's law. If the polarized plane wave is incident at θ_i , the angle on the free space–chiral interface at $z = 0$, as shown in figure 1, the angles of the two circularly polarized waves can be obtained:

$$\theta_{LCP,RCP}^2 = \sin^{-1} \left(\left(\frac{n_0}{n_{L,R}} \right) \sin \theta_i \right). \quad (5)$$

The LCP and RCP waves inside a wedge-shaped chiral media in figure 2, obtained from equation (2), will propagate through the wedge in the same direction as the incident wave, since $\theta_{LCP,RCP}^2 = \theta_i = 0^\circ$; however, because of the circular birefringence, there will be two waves impinging on region 3 with different directions.

The angles of the transmitted wave from the two chiral refractive indices can be calculated from

$$\theta_{LCP,RCP}^t = \sin^{-1} \left(\left(\frac{n_{L,R}}{n_0} \right) \sin \theta_2 \right). \quad (6)$$

If the refractive index of either the LCP or RLC wave inside the chiral media is positive, the transmitted wave will impinge with an angle $+\theta_t$, stated as the PRI (or positive refractive index), as shown in figure 3, and vice versa.

The chirality parameter (κ), the material parameter factor (ρ) and the relation between $|\kappa^R|$ and $(\sqrt{\epsilon_r \mu_r})^R$ determine the

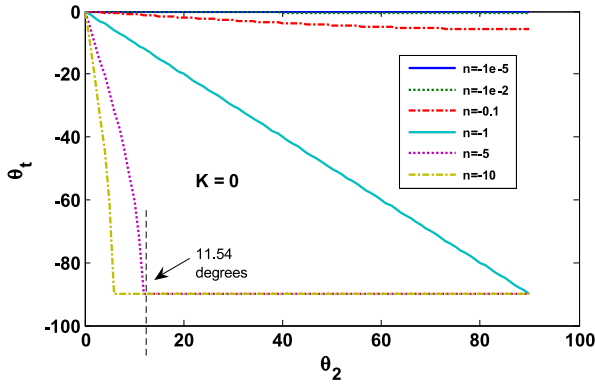


Figure 4. The relationship between incident and transmitted angles with different refractive index values.

conditions under which the transmitted waves will propagate. Six states of light splitting effects in chiral media are shown in figure 6. PRI ($n > 0$) or NRI ($n < 0$) stands for an effective refractive index in the chiral materials. Behind the wedge, two out-going waves are represented by the two arrows, with the bold arrow indicating the dominant circular polarized wave. The clockwise and counterclockwise rotation arrows designate LCP and RCP waves, respectively.

To maintain both out-going waves, the condition $n_{L,R} \sin \theta_2 \leq 1$ for the LCP and RCP waves needs to be satisfied. Otherwise, total internal reflection will take place. The critical angle of incidence θ_2 (the angle of the wedge) can be obtained by setting θ_{LCP}^t and θ_{RCP}^t to 90° .

$$\theta_{LCP,RCP}^{2,critical} = \sin^{-1} \left(\frac{n_0}{n_{LCP,RCP}} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r \mp \kappa}} \right). \quad (7)$$

Figure 4 shows the relationship between the incident angle (θ_2) inside the non-chiral medium and the transmitted angle (θ_t). Here, we consider only the case when the effective refractive index of the chiral media (n) is negative. Negative values of θ_t imply NRI properties of the media and vice versa. The straight line $\theta_t = -90^\circ$ indicates a total internal reflection or the occurrence of an evanescent wave. In the case of non-chiral media, if the index of refraction is large, the incident angle needs to be very small in order to have a transmitted wave. For instance, in the case of $n = -5$, the largest possible incident angle is only 11.54° and even smaller at 5.74° for $n = -10$.

Chiral media with two indices ($n_{L,R}$), give more flexibility to maintain the propagation. The two indices are directed by the chirality of the media. With the same incident angle, there could be either an LCP or RCP wave, or both that can propagate through the media. Figure 5 presents the relationship between the critical angles of LCP and RCP waves and chirality parameters (κ) when index of refraction is varied.

The straight lines, $\theta_2 = 90^\circ$ and -90° , in figure 6 represent the maximum angle of the incident wave. These lines appear at $-1 \leq \kappa \leq +1$ for smaller n (e.g. $n = -10^{-5}$, -0.01 , and -0.1). The critical angle of CP waves with these small n decreases as $|K|$ increases. In the case of $n = -1$, at $\kappa = 1$ and $\kappa = -1$, for LCP and RCP waves respectively, the

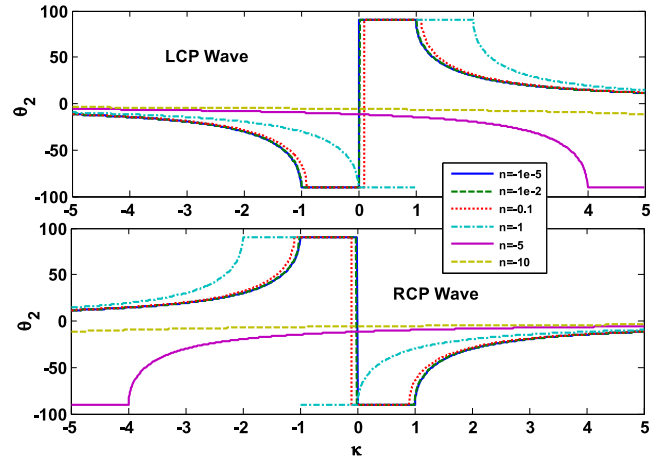


Figure 5. Relationship between critical angles of LCP and RCP waves and chirality with different refractive index values.

critical angle changes its sign and decreases toward zero. With a high value of n (e.g. $n = -5$ and -10), the critical angle is extremely small throughout the range of κ ($-5 \leq \kappa \leq +5$), implying that a higher value of κ is needed in order to avoid the occurrence of an evanescent wave.

As shown in figure 6, the angles $\theta_t(\text{LCP})$ and $\theta_t(\text{RCP})$ have opposite signs when $|\kappa| > n$, according to their refractive index value ($n_{L,R}$) (based on the relationship presented in figures 3(c)–(f)). With a larger value of $|n|$, the incident angle plays a significant role in the selection of transmitted waves. For instance, at $n = -5$ and $\kappa = 0.25$, the LCP transmitted wave exists only if $\theta_2 < 12.15^\circ$, and the RCP transmitted wave exists only if $\theta_2 < 10.98^\circ$. If $|\kappa| = n$, there is either LCP or RCP wave inside the chiral media; thus, only one wave will propagate to region 3. This phenomenon is observed in figure 6(b) when $\kappa = 1$ and $n = -1$ and only the RCP wave exists; if an infinite lossless chiral slab is considered, only half the total transmitted power will be observed.

In lossy chiral media, the intensity of the two transmitted waves is not equal due to the circular dichroism or differential absorption [30]. The amplitudes of the reflected and transmitted waves from the chiral media (slab/wedge) can be obtained by methods [1, 30–34] proposed for regular positive refractive index chiral media, without the restriction that the effective refractive index needs to be positive. In the special case when both ϵ_r^R and μ_r^R change sign, though optical rotation is not affected, the circular dichroism does reverse in sign [35], i.e. there is a switch between the absorption of the LCP and RCP wave, so that one change will be of greater dominance and vice versa.

4. Conclusions

Two circularly polarized waves propagating in chiral metamaterials are studied. A wedge-shaped chiral structure is used to observe the behavior of the splitting transmitted waves as an arbitrary polarized plane wave was incident on chiral metamaterials. Six states of splitting waves are found in chiral metamaterials. The refractive indices and the rotations of the out-going waves from the metamaterials depend on their chirality

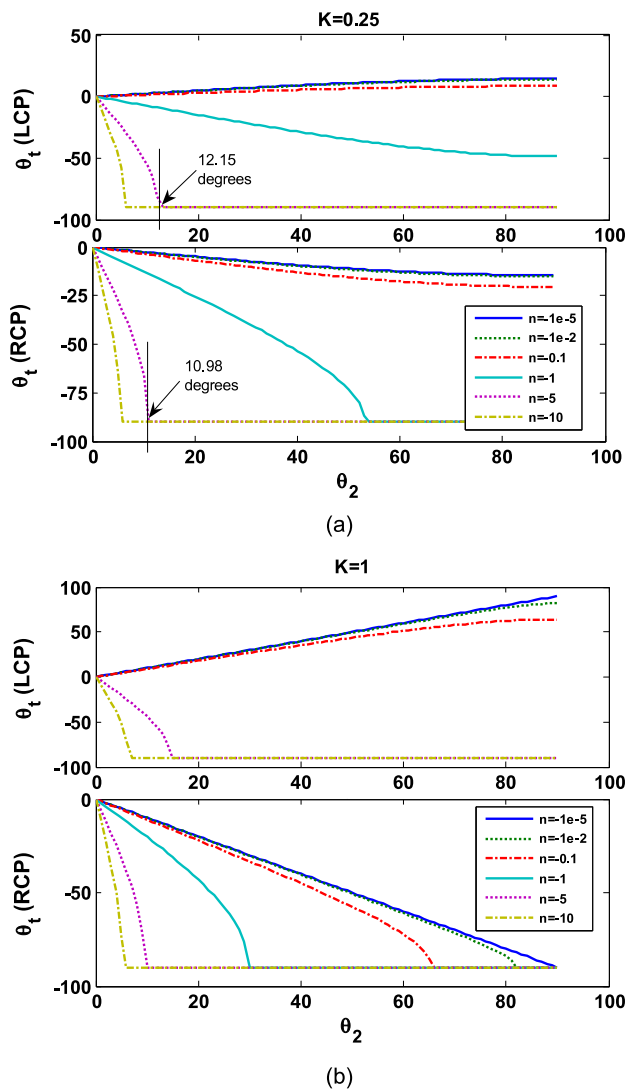


Figure 6. Relationship between incident and transmitted angles with different refractive index values where (a) $K = 0.25$ and (b) $K = 1$.

parameter, electromagnetic parameters and reference regime. The incident angle, or the angle of the wedge, plays a significant role in selecting the out-going waves and the occurrence of an evanescent wave.

Acknowledgments

We would like to thank Dr John Derov from the Air Force Research Lab (AFRL), Dr Kenneth A Marx from the University of Massachusetts Lowell, USA, and Dr Wanlop Surakampon-torn from King Mongkut's Institute of Technology, Ladkrabang, Thailand, for their guidance. This work was supported in part by the Thailand Research Fund (Grant MRG5180190) and the Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Thailand.

References

- [1] Bassiri S, Papas C H and Engheta N 1988 Electromagnetic wave propagation through a dielectric-chiral interface and through a chiral slab *J. Opt. Soc. Am. A* **5** 1450–9

- [2] Mackay G and Lakhtakia A 2004 Plane waves with negative phase velocity in Faraday chiral mediums *Phys. Rev. E* **69** 026602
- [3] Lakhtakia A, Varadan V K and Varadan V V 1989 Time-harmonic electromagnetic fields in chiral media *Lecture Notes in Physics* (Berlin: Springer) p 335
- [4] Hecht E 1998 *Optics* 3rd edn (Reading, MA: Addison-Wesley)
- [5] Tretyakov S, Nefedov I, Sihvola A, Maslovski S and Simovski C 2003 Waves and energy in chiral nihility *J. Electromagn. Waves Appl.* **17** 695–706
- [6] Pendry J B 2004 A chiral route to negative refraction *Science* **306** 1353–5
- [7] Lindman K F 1920 Über eine durch ein isotropes System von Spiralformigen Resonatoren erzeugte Rotationspolarisation der elektromagnetischen Wellen *Ann. Phys., Lpz.* **63** 621–44
- [8] Guerin F 1994 Microwave chiral materials: a review of experimental studies and some results on composites with ferroelectric ceramic inclusions *Prog. Electromagn. Res.* **9** 219–63
- [9] Potts A, Papakostas A, Zheludev N I, Coles H J, Greef R and Bagnall D M 2003 Planar chiral meta-materials for photonic devices *J. Mater. Sci., Mater. Electron.* **14** 393–5
- [10] Papakostas A, Potts A, Bagnall D M, Prosvirnin S L, Coles H J and Zheludev N I 2003 Optical manifestations of planar chirality *Phys. Rev. Lett.* **90** 107404
- [11] Potts A, Papakostas A, Bagnall D M and Zheludev N I 2004 Planar chiral meta-materials for optical applications *Microelectron. Eng.* **73/74** 367–71
- [12] Plum E, Zhou J, Dong J, Fedotov V A, Koschny T, Soukoulis C M and Zheludev N I 2009 Metamaterial with negative index due to chirality *Phys. Rev. B* **79** 035407
- [13] Wongkasem N, Akyurtlu A, Marx K A, Dong Q, Li J and Goodhue W D 2007 Development of chiral negative refractive index metamaterials for the terahertz frequency regime *IEEE Trans. Antennas Propag.* **55** 3052–62
- [14] Wang B, Zhou J, Koschny Th and Soukoulis C M 2009 Nonplanar chiral metamaterials with negative index *Appl. Phys. Lett.* **94** 151112
- [15] Matra K and Wongkasem N 2009 Left-handed chiral isotropic metamaterials: analysis and detailed numerical study *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **11** 074011
- [16] Wongkasem N, Akyurtlu A, Marx K A, Goodhue W D, Li J, Dong Q and Ada E 2007 Lithographic fabrication of a novel micron scale metamaterials structures-based chiral metamaterial: theoretical experimental and analysis of its Y-chiral and negative index of refraction properties in the terahertz and microwave regime *Microsc. Res. Tech.* **70** 497–505
- [17] Baev A, Samoc M, Prasad P N, Krykunov M and Autschbach J 2007 A quantum chemical approach to the design of chiral negative index materials *Opt. Express* **15** 5730
- [18] Zhang S, Park Y S, Li J, Lu X, Zhang W and Zhang X 2009 Negative refractive index in chiral metamaterials *Phys. Rev. Lett.* **102** 023901
- [19] Mackay T G 2005 Plane waves with negative phase velocity in isotropic chiral mediums *Microw. Opt. Technol. Lett.* **45** 120–1
- [20] Mackay T G and Lakhtakia A 2007 Simultaneous negative—and positive—phase-velocity propagation in an isotropic chiral medium *Microw. Opt. Technol. Lett.* **49** 1245–6
- [21] Ghosh A and Fischer P 2006 Chiral molecules split light: reflection and refraction in a chiral liquid *Phys. Rev. Lett.* **97** 173002
- [22] Jin Y and He S 2005 Focusing by a slab of chiral medium *Opt. Express* **13** 4974–9
- [23] Qiu C-W, Burokur N, Zouhd S and Li L-W 2008 Chiral nihility effects on energy flow in chiral materials *J. Opt. Soc. Am. A* **25** 55–63

- [24] Zhou J, Dong J, Wang B, Koschny Th, Kafesaki M and Soukoulis C M 2009 Negative refractive index due to chirality *Phys. Rev. B* **79** 121104
- [25] Chen L F, Ong C K, Neo C P, Varadan V K and Varadan V V 2004 *Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization* (New York: Wiley)
- [26] Qiu C-W, Yao H-Y, Li L-W, Zouhdi S and Yeo T-S 2007 Backward waves in magnetoelectrically chiral media: propagation, impedance, and negative refraction *Phys. Rev. B* **75** 155120
- [27] Qiu C-W, Burokur N, Zouhd S and Li L-W 2008 Chiral nihility effects on energy flow in chiral materials *J. Opt. Soc. Am. A* **25** 55–63
- [28] Lakhtakia A 1991 A case for magnetic sources *Phys. Essays* **4** 105–7
- [29] Lindell I V, Sihvolar A H, Tretyakov S A and Viitanen A J 1994 *Electromagnetic Waves in Chiral and Bi-Isotropic Media* (Boston, MA: Artech House)
- [30] Silverman M P 1986 Reflection and refraction at the surface of a chiral medium: comparison of gyrotropic constitutive relations invariant or noninvariant under a duality transformation *J. Opt. Soc. Am. A* **3** 830–7
- [31] Schmidt M and Eidner K 1990 Electromagnetic wave propagation through an isotropic chiral slab: solution for oblique incidence *Optik* **84** 43–6
- [32] Tanaka M and Sueyoshi H 1992 Scattering of electromagnetic plane waves by a chiral slab *Electron. Commun. Japan II* **75** 34–43
- [33] Georgievan E 1995 Reflection and refraction at the surface of an isotropic chiral medium: eigenvalue-eigenvector solution using a 4×4 matrix method *J. Opt. Soc. Am. A* **12** 2203–11
- [34] Sah Y and Krishna J G 2001 Optical properties of an isotropic optically active medium at oblique incidence *J. Opt. Soc. Am. A* **18** 1388–92
- [35] Lakhtakia A 2002 Reversed circular dichroism of isotropic chiral mediums with negative real permeability and permittivity *Microwave Opt. Technol. Lett.* **33** 96–7