

บทที่ 2

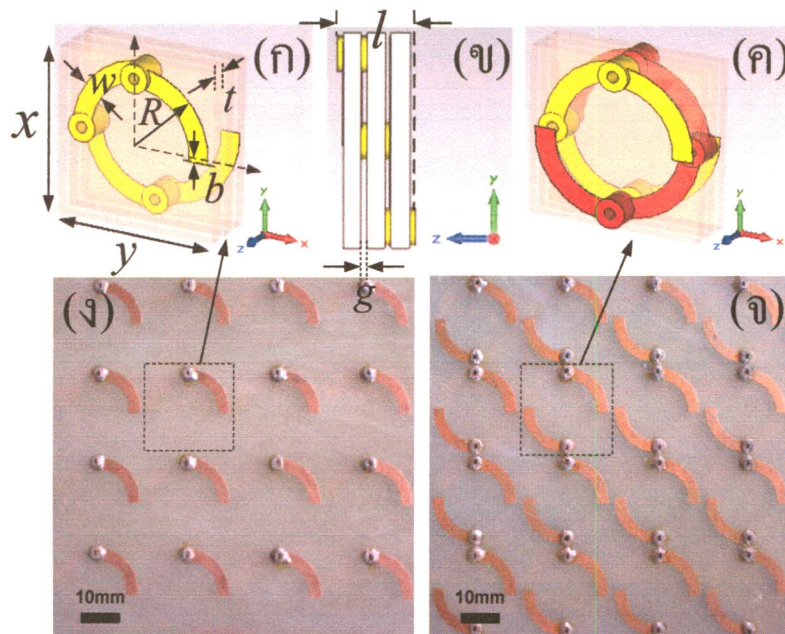
วิธีการทดลอง ผลการวิจัย และการวิเคราะห์ผล

2.1 โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ที่ค่าดัชนีหักเหมีค่าสูง ดัดลบ และมีค่า Chirality

2.2.1 โครงสร้างเกลียว (Helix Structures)

โครงสร้าง Multilayer 3D helix

ได้ศึกษาการปรับทางกายภาพของโครงสร้าง Multilayer 3D helix มีทั้งแบบ Single และ Double helix ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของโครงสร้างประกอบไปด้วย ระยะความสูงของเกลียว (Helix pitch, l) รัศมีของเกลียว (Helix radius, R) ความกว้างของตัวนำ (Line width, w) และความยาวของส่วนที่เกิดการคับปลิงระหว่างชั้นของทองแดง (Coupling length, b) ซึ่งการปรับทางกายภาพต่าง ๆ ของโครงสร้างนั้นสามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ค่าโคแวล ค่าดัชนีหักเหและค่าการสูญเสียได้



รูปที่ 2.1 โครงสร้าง Unit cell ของ Multilayer 3D single helix (ก) มองมุมเฉียง และ (ข) มองด้านข้าง (ค) Unit cell ของ Multilayer 3D double helix (ง) และ (จ) โครงสร้างจริงของ Multilayer 3D single และ double helix ตามลำดับ

รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้าง Unit cell ของ Multilayer 3D helix ทั้งแบบ Single และ double helix ซึ่งทั้งสองโครงสร้างใช้แผ่น FR-4 เป็น Substrate มีค่า $\epsilon = 4.3 + 0.023i$ มี

ความหนาของทองแดงเท่ากับ 0.03 mm ขนาดของโครงสร้างมีค่าดังนี้ $x = y = 18.5\text{mm}$ $w = 2.25\text{mm}$ $l = 6.94\text{mm}$ $g = 0.535\text{mm}$ $b = 0.5\text{mm}$ $R = 8.75\text{mm}$ และ $t = 1.6\text{mm}$ จากนั้นใช้โปรแกรม CST MWS ในการหาค่า S parameter ของโครงสร้าง โดยใช้เงื่อนไขขอบเขตเป็น Unit cell (เสมือนโครงสร้างเป็นรายคาบ) และส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งแบบ RCP และ LCP ทางแกน $-z$ จากนั้นเลือกจุดสังเกตค่า S parameter ที่หน้าและหลังของโครงสร้าง เมื่อได้ค่า S parameter ที่ต้องการแล้วก็นำมาหาค่าคุณสมบัติต่างๆ ของโครงสร้าง

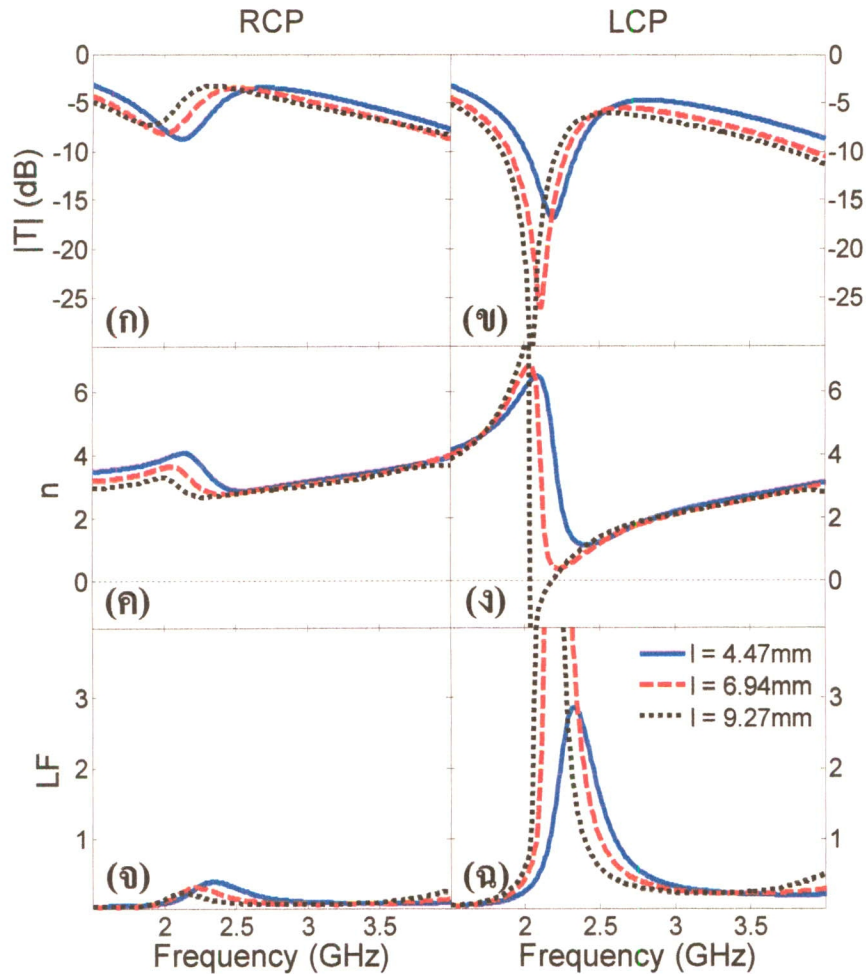
โครงสร้าง Multilayer 3D single นั้นจะประกอบไปด้วยทองแดงที่มีรูปร่างเป็นวงแหวนมี 4 ชั้น และมี Substrate 3 ชั้น ซึ่งแต่ละชั้นตัววงแหวนจะเชื่อมต่อกันโดย Path through hole (PTH) โดยเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายในของ Hole เท่ากับ 3.25 mm และ 1.25 mm ตามลำดับ ซึ่งแสดงดังรูป 2.1 (ก-ข) สำหรับมุมมองแบบเฉียงและด้านข้าง ตามลำดับ เช่นเดียวกันกับโครงสร้าง Multilayer 3D double helix ที่ออกแบบเหมือนกันกับ Single helix แต่เพิ่มจำนวนวงแหวนที่เหมือนกันแต่วางตรงข้ามกันหรือหมุนมา 180 องศา (วงแหวนสีแดง) ซึ่งแสดงดังรูป 2.1 (ค) ในส่วนรูป 2.1 (ง-จ) แสดงโครงสร้างจริงที่ได้ออกแบบมีขนาด 10×10 unit cells ของ Single และ Double helix ตามลำดับ โดยกรอบเส้นประ แสดงถึง Unit cell ของทั้งสองโครงสร้าง

ในส่วนของการวัดเราจะใช้เครื่อง Vector Network Analyzer (HP8753D) ใช้ร่วมกับ Horn antennas ที่ได้ออกแบบไว้แล้ว วัดค่า S parameter ของ Co- และ Cross- polarizations และนำมาใช้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อน

การปรับความสูงของเกลียว (Helix pith, h)

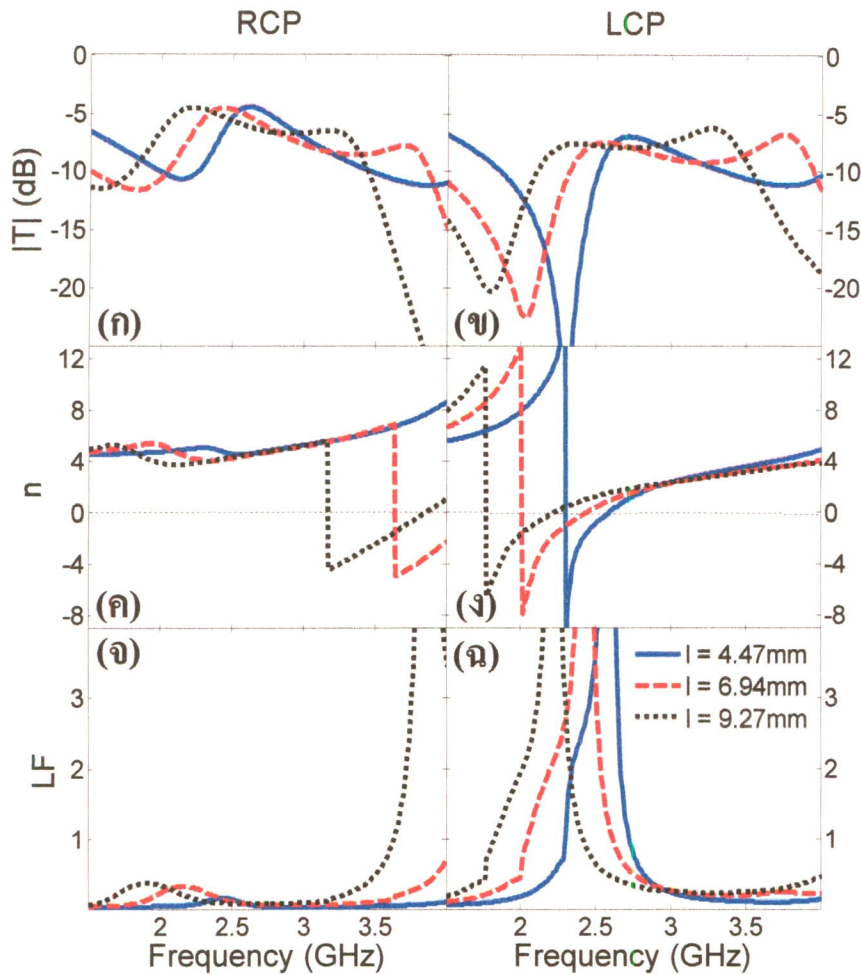
ในการเปลี่ยนแปลงความสูงของเกลียวนั้น ทำได้โดยการปรับความหนาของ Substrate ของโครงสร้าง ในกรณีที่เพิ่มความหนาเพิ่มขึ้นจะทำให้ลักษณะของโครงสร้างของ Multilayer 3D helix นั้นมีความสูงเพิ่มขึ้น โดยในการปรับนั้นเราจะใช้ค่า Substrate ของ FR-4 เป็น 0.8mm 1.6mm และ 2.4mm จะทำให้ความสูงของเกลียวเป็น 4.47mm 6.94mm และ 9.27mm ตามลำดับ โดยจะศึกษาตัวแปรที่สำคัญ คือ S_{21} ค่าดัชนีหักเห และค่าการสูญเสียของทั้ง RCP และ LCP แสดงดังรูปที่ 2.2 (ก-ข) เป็นสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของ RCP และ LCP ของโครงสร้าง Multilayer 3D single helix ตามลำดับ เมื่อเราสนใจที่ความสูงของโครงสร้างเท่ากับ 6.94mm (กราฟเส้นประสีแดง : Red dash line) จะเห็นได้ว่าโครงสร้าง Multilayer 3D single helix ซึ่งคลื่น RCP สามารถส่งผ่านออกไปได้มีค่าการส่งผ่านน้อยกว่า -8dB ที่ความถี่ที่เกิดเรโซแนนซ์ หรือ 2.1GHz ในขณะที่คลื่น LCP จะไม่สามารถส่งผ่านออกมาได้ โดยมีแอมพลิจูดของการส่งผ่านประมาณ -25dB ในขณะที่ค่าดัชนีหักเห แสดงดังรูปที่ 2.2 (ค-ง) สำหรับ RCP และ LCP ค่า n ของ RCP นั้นจะเป็นบวกเช่นเดียวกับ LCP โดยมีค่าเท่ากับ 3 และ 6 ที่ความถี่

2.1GHz แต่ที่ความถี่ดังกล่าวคลื่น LCP มีค่าการสูญเสียที่สูง (มากกว่า 1) แสดงดังรูปที่ 2.2 (จ-ฉ) ในขณะที่ RCP มีค่าการสูญเสียที่ต่ำ (น้อยกว่า 0.4)



รูปที่ 2.2 การปรับ / เมื่อ (ก) และ (ข) คือสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (ค) และ (ง) ดัชนีหักเห (จ) และ (ฉ) การสูญเสีย ของ RCP และ LCP ตามลำดับ สำหรับ Multilayer 3D single helix

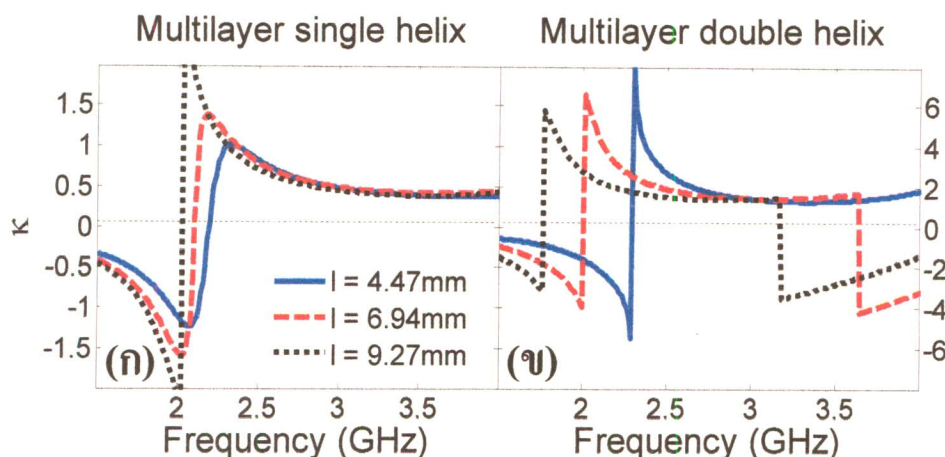
เมื่อปรับความสูงของโครงสร้างเป็น 4.47mm 6.94mm และ 9.27mm นั้น แสดงดังรูปที่ 2.2 โดยขนาดของโครงสร้างที่เหลือยังเหมือนเดิม จะพบว่าการเกิดเรโซแนนซ์ของโครงสร้างเปลี่ยนไปคือ เมื่อเพิ่มความสูงของโครงสร้างจะทำให้ความถี่ที่เกิดเรโซแนนซ์นั้นเลื่อนซ้าย หรือมีความถี่ที่ต่ำลงและการเกิด dip สูงขึ้น และทำให้เกิดค่าดัชนีหักเหที่ติดลบ แสดงดังรูปที่ 2.2 (ง) เส้นกราฟดอทสีดำ (Black dot line) แต่ก็ยังมีค่าการสูญเสียที่สูง การเพิ่มความสูงของโครงสร้างยังทำให้โครงสร้างนั้นมีความเป็นเนื้อเดียวเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ลดลง



รูปที่ 2.3 การปรับ / เมื่อ (ก) และ (ข) คือสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (ค) และ (ง) ดัชนีหักเห (จ) และ (ฉ) การสูญเสีย ของ RCP และ LCP ตามลำดับ สำหรับ Multilayer 3D double helix

รูปที่ 2.3 แสดงผลการปรับโครงสร้าง Multilayer 3D double helix เช่นเดียวกับกับโครงสร้าง Multilayer 3D single helix จะสามารถส่งผ่านคลื่น RCP และบล็อกคลื่น LCP ได้โดยมีเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 2GHz สำหรับค่า $l = 6.94\text{mm}$ เมื่อเราเพิ่มความสูงของโครงสร้างนั้น จะทำให้การเกิดเรโซแนนซ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นเลื่อนซ้าย หรือให้ความถี่ต่ำลง เป็นแนวเดียวกันกับโครงสร้างแบบ Multilayer 3D single helix แต่ค่าดัชนีหักเหของ Double helix นั้นจะมีค่าที่สูงกว่า Single helix และเกิดค่าดัชนีหักเหที่ติดลบด้วย

เมื่อพิจารณาค่าไคเรล ของโครงสร้าง Multilayer 3D single และ double helix ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.4 โดยค่าไคเรลของ Double helix นั้นมีค่าสูงกว่าโครงสร้าง Single helix และเมื่อเพิ่มความสูงของโครงสร้างมากขึ้น จะทำให้ค่าไคเรลสูงขึ้นและความถี่เลื่อนลดลงสำหรับ Multilayer 3D single helix แสดงดังรูปที่ 2.4 (ก)

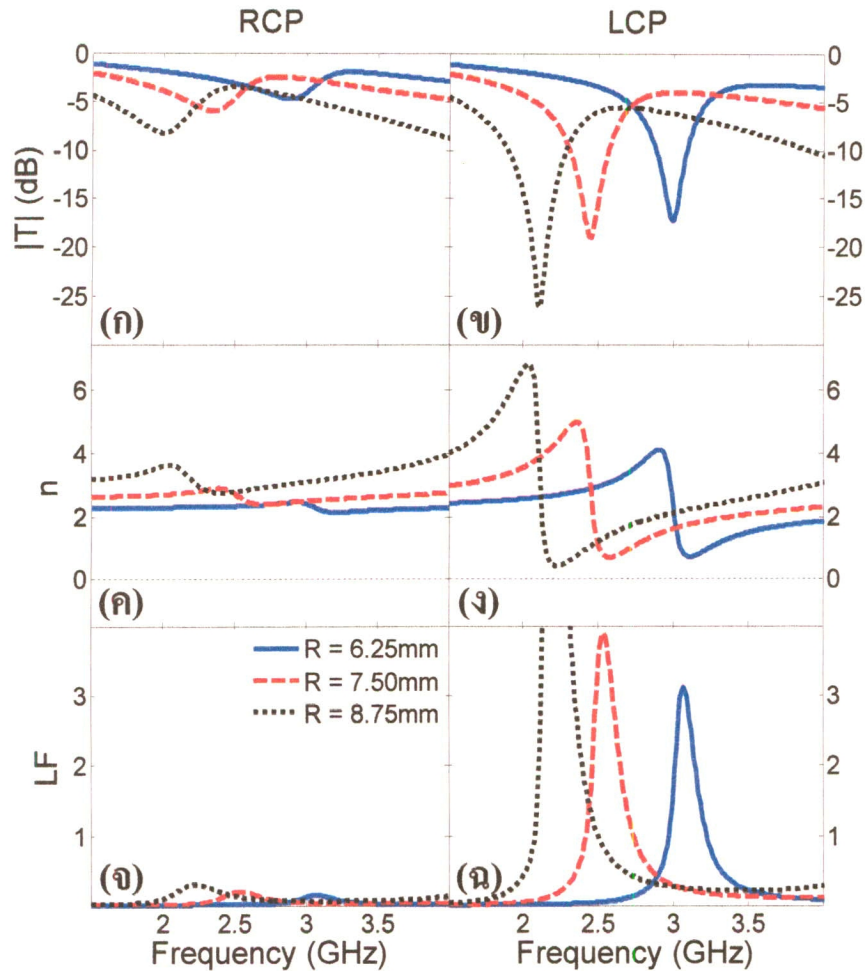


รูปที่ 2.4 การปรับ l เมื่อ (ก) และ (ข) คือค่าไคเรล สำหรับ Multilayer 3D single และ double helix ตามลำดับ

ในขณะที่โครงสร้าง Multilayer 3D double helix นั้น ค่าไคเรลเลื่อนความถี่ลง เมื่อเพิ่มความสูงของโครงสร้าง และทำให้ค่าไคเรลลดลงด้วย ซึ่งแสดงดังรูป 2.4 (ข)

การปรับรัศมีของเกลียว (Helix radius, R)

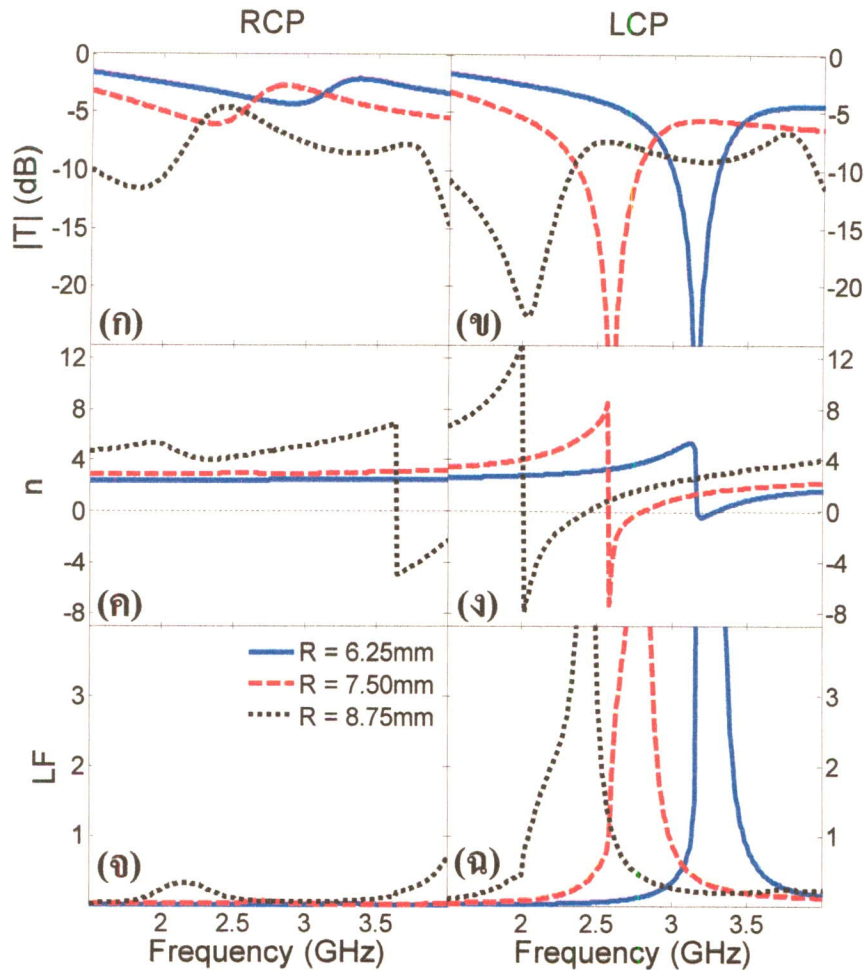
การปรับรัศมีของเกลียวนี้จะส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของค่าต่างๆ เมื่อปรับ R เป็น 6.25mm 7.50mm และ 8.75mm โดยขนาดของโครงสร้างอื่นๆยังคงไว้เหมือนเดิม รูปที่ 2.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ค่าดัชนีหักเหและค่าการสูญเสียของคลื่น RCP และ LCP ของโครงสร้าง Multilayer 3D single helix จากเดิมที่รัศมีของเกลียวเป็น 8.75mm นั้น คลื่น RCP จะถูกส่งผ่าน แสดงดังรูป 2.5 (ก) และจะเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 2.1GHz สำหรับ LCP แสดงดังรูป 2.5 (ข) เมื่อรัศมีของเกลียวลดลงการส่งผ่านของคลื่น RCP ดีขึ้น มีค่าน้อยกว่า -5dB และความถี่ที่เกิดเรโซแนนซ์สำหรับ LCP นั้นสูงขึ้น จากเดิมเป็น 2.1GHz เปลี่ยนแปลงไปเป็น 2.5GHz และ 3GHz สำหรับรัศมีของเกลียวเป็น 7.50mm และ 6.25mm ตามลำดับ และยังส่งผลให้การ dip ของเรโซแนนซ์ลดลงด้วย สำหรับค่าดัชนีหักเหแสดงดังรูป 2.5 (ค-ง) สำหรับ RCP และ LCP โดยจะมีค่าเป็นบวกทั้งคู่ สำหรับคลื่น RCP เมื่อลดขนาดรัศมีของเกลียวลงจะทำให้ค่าดัชนีหักเหลดลงตามไปด้วยทุกความถี่ เช่นเดียวกันกับ LCP ไม่เพียงแต่ขนาดลดลงเท่านั้น ความถี่ที่เกิดขึ้นก็เลื่อนขวา หรือความถี่สูงขึ้นด้วย รูปที่ 2.5 (จ-ฉ) นั้นแสดงการสูญเสียของโครงสร้างของทั้ง RCP และ LCP ตามลำดับ แน่นอนว่าเมื่อคลื่น RCP สามารถส่งผ่านได้ทำให้ค่า LF นั้นต่ำ <0.4 แต่ในขณะที่ LCP นั้นในช่วงความถี่ที่เกิดเรโซแนนซ์ จะทำให้ LF นั้นสูง >1 ส่งผลให้คลื่น LCP ไม่สามารถส่งผ่านได้



รูปที่ 2.5 การปรับ R เมื่อ (ก) และ (ข) คือสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (ค) และ (ง) ดัชนีหักเห (จ) และ (ฉ) การสูญเสีย ของ RCP และ LCP ตามลำดับ สำหรับ Multilayer 3D single helix

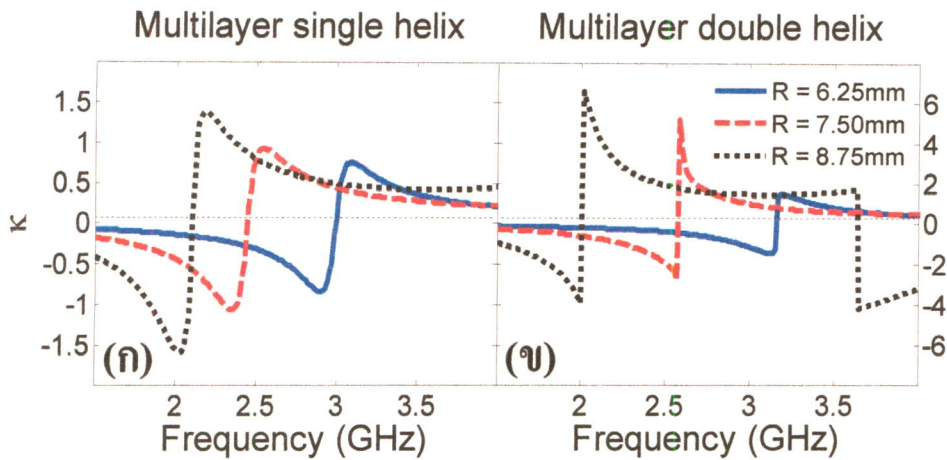
ในขณะที่การปรับรัศมีของเกลียวของโครงสร้าง Multilayer 3D double helix แสดงดังรูป 2.6 โดยการสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่น RCP และ LCP มีพฤติกรรมคล้ายคลึงกันกับโครงสร้าง Multilayer 3D single helix คือเมื่อลดรัศมีของเกลียวลง จะทำให้คลื่น RCP ส่งผ่านได้ดียิ่งขึ้น ในขณะที่คลื่น LCP ตำแหน่งการเกิดเรโซแนนซ์จะเพิ่มขึ้น (ความถี่สูงขึ้น) และมีแบนวิทแคบลง ซึ่งแสดงดังรูป 2.6 (ก-ข) ในขณะที่ค่าดัชนีหักเห แสดงดังรูป 2.6 (ค-ง) สำหรับ RCP และ LCP จากเดิมที่ $R = 8.75\text{mm}$ ดัชนีหักเหของคลื่น RCP นั้นจะเป็นบวกในช่วงความถี่ $1.5\text{GHz} - 3.6\text{GHz}$ และเป็นลบในช่วง $3.6\text{GHz} - 4\text{GHz}$ เมื่อเพิ่มรัศมีของเกลียวจะทำให้ค่าดัชนีหักเหของคลื่น RCP เป็นบวกทุกความถี่ ในขณะที่ดัชนีหักเหของคลื่น LCP นั้นจะลดลงเมื่อรัศมีของเกลียวลดลงและความถี่ก็เลื่อนขวา (สูงขึ้น) และค่าการสูญเสียแสดงดังรูป 2.6 (จ-ฉ) สำหรับ RCP และ LCP ตามลำดับ มีลักษณะที่คล้ายคลึงกับโครงสร้าง Multilayer 3D single helix คือ

คลื่น RCP สามารถส่งผ่านได้ทำให้มี LF ต่ำ น้อยกว่า 0.4 ในขณะที่ช่วงที่เกิดเรโซแนนซ์สำหรับ LCP นั้นจะมีค่า LF ที่สูง หรือ >1



รูปที่ 2.6 การปรับ R เมื่อ (ก) และ (ข) คือสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (ค) และ (ง) ดัชนีหักเห (จ) และ (ฉ) การสูญเสีย ของ RCP และ LCP ตามลำดับ สำหรับ Multilayer 3D double helix

เมื่อพิจารณาค่าโคแวลสำหรับโครงสร้าง Multilayer 3D single และ double helix นั้นแสดงดังรูปที่ 2.7 (ก-ข) ตามลำดับ เมื่อลดรัศมีของเกลียวลง จะทำให้ค่าโคแวลลดลงและความถี่สูงขึ้นด้วย ทั้งโครงสร้างแบบ Multilayer 3D single และ double helix โดยโครงสร้าง Multilayer 3D double helix จะมีความเป็นโคแวลสูงกว่าโครงสร้าง Multilayer 3D single helix นั้นทำให้โครงสร้าง Multilayer 3D double helix สามารถเกิดค่าดัชนีหักเหที่ติดลบได้



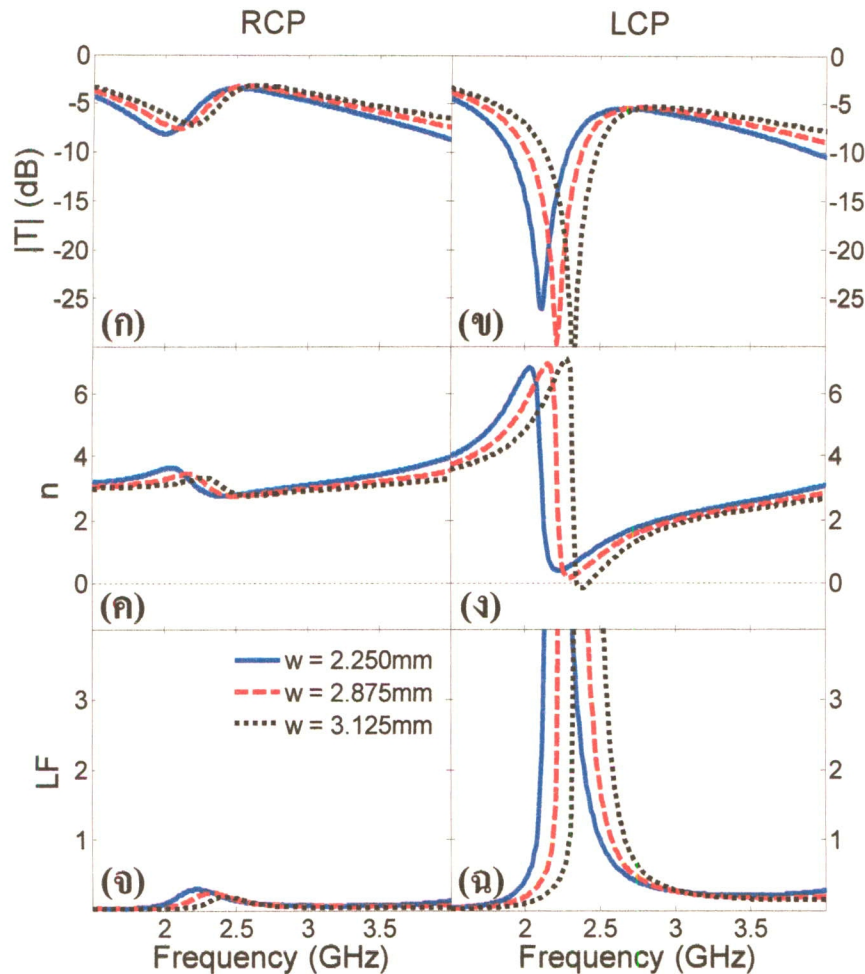
รูปที่ 2.7 การปรับ R เมื่อ (ก) และ (ข) คือค่าไครล สำหรับ Multilayer 3D single และ double helix ตามลำดับ

การปรับความกว้างของตัวนำ (Line width, w)

ในการปรับความกว้างของตัวนำนั้นจะปรับจากเดิม 2.250mm เพิ่มเป็น 2.875mm และ 3.125mm และขนาดอื่นๆ ของโครงสร้างใช้ค่าเดิม รูปที่ 2.8 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ค่าดัชนีหักเห และค่าการสูญเสีย ของ RCP และ LCP ของโครงสร้าง Multilayer 3D single helix เมื่อปรับ w โดยคลื่น RCP สามารถส่งผ่านโครงสร้างนี้ได้ และเมื่อระยะความกว้างของตัวนำเพิ่มขึ้น จะทำให้ตำแหน่งของการเกิดเรโซแนนซ์ของคลื่น LCP นั้นสูงขึ้น หรือการ dip ของความถี่เลื่อนขวา แสดงดังรูปที่ 2.8 (ก-ข) และค่าดัชนีหักเห แสดงดังรูป 2.8 (ค-ง) สำหรับคลื่น RCP และ LCP ตามลำดับ สำหรับค่าดัชนีหักเหของคลื่น RCP นั้นเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยและมีค่าเป็นบวก ในขณะที่ค่าดัชนีหักเหของคลื่น LCP ขนาดมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเช่นกัน แต่เกิดการเลื่อนความถี่สูงขึ้น เมื่อเพิ่มความกว้างของตัวนำ รูปที่ 2.8 (จ-ฉ) แสดงค่าการสูญเสียของทั้ง RCP และ LCP ตามลำดับ เช่นกันกับการปรับตัวแปรอื่นๆ ค่าการสูญเสียของ RCP นั้นจะมีค่าต่ำ เนื่องจากโครงสร้างมีการส่งผ่านของคลื่น RCP ที่ดี ในขณะที่คลื่น LCP นั้นจะมีการสูญเสียที่สูงที่ตำแหน่งที่เกิดเรโซแนนซ์

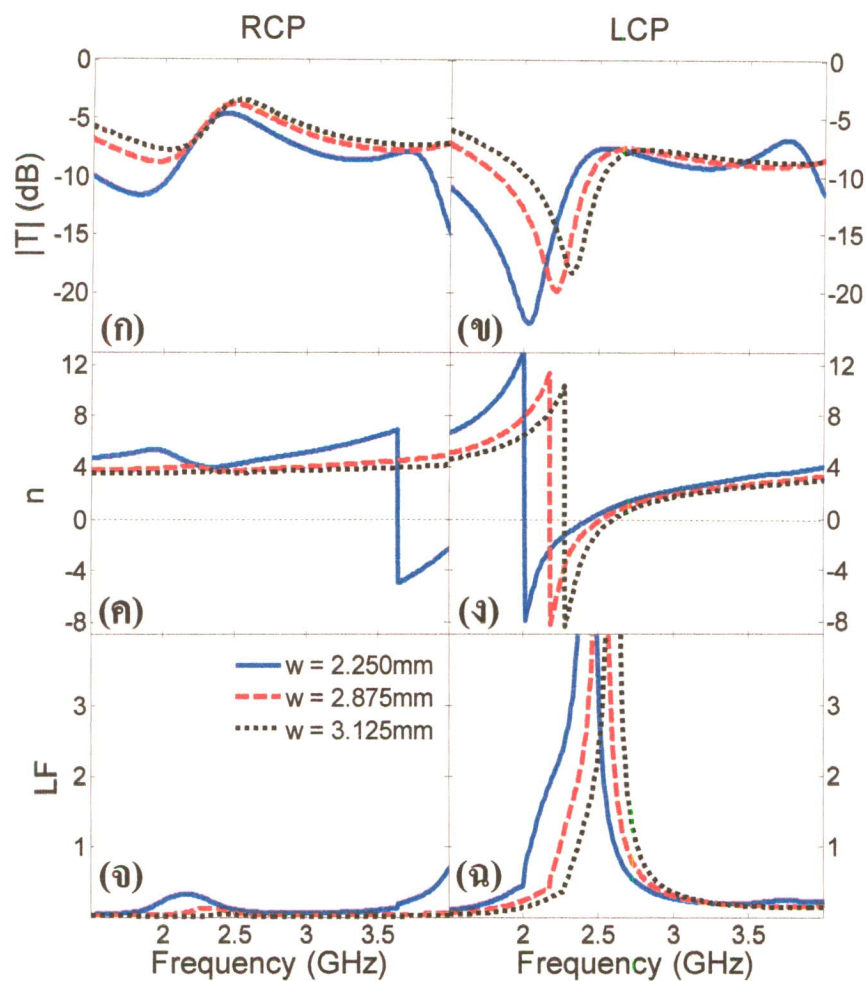
สำหรับการปรับค่า w โครงสร้าง Multilayer 3D double helix นั้น แสดงดังรูปที่ 2.9 โดยรูป 2.9 (ก-ข) แสดงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของ RCP และ LCP ตามลำดับ สำหรับการส่งผ่านของคลื่น RCP นั้นจะดีขึ้น เมื่อเพิ่มความกว้างของตัวนำ ในขณะที่คลื่น LCP นั้น จะทำให้ตำแหน่งของเรโซแนนซ์เลื่อนขวา หรือความถี่สูงขึ้น และค่าดัชนีหักเหของคลื่น RCP และ LCP แสดงดังรูปที่ 2.9 (ค-ง) ตามลำดับ โดยจากเดิมที่ความถี่ 3.7GHz สำหรับ n ของ RCP นั้นเป็นค่าที่ติดลบ เมื่อเพิ่มความกว้างของตัวนำ ทำให้ค่าดัชนีหักเหเป็นบวกทั้งหมด ในขณะที่คลื่น LCP นั้น จะให้ค่าดัชนีหักเหที่ติดลบเสมอแต่ตำแหน่งของช่วงที่ติดลบจะเลื่อนตามตำแหน่ง

ของความถี่ที่เกิดเรโซแนนซ์ และค่าการสูญเสียแสดงดังรูปที่ 2.9 (จ-ฉ) แน่นนอนว่าคลื่น RCP นั้นมีค่าการสูญเสียที่ต่ำ ในขณะที่คลื่น LCP มีค่าการสูญเสียสูงที่ความถี่เรโซแนนซ์

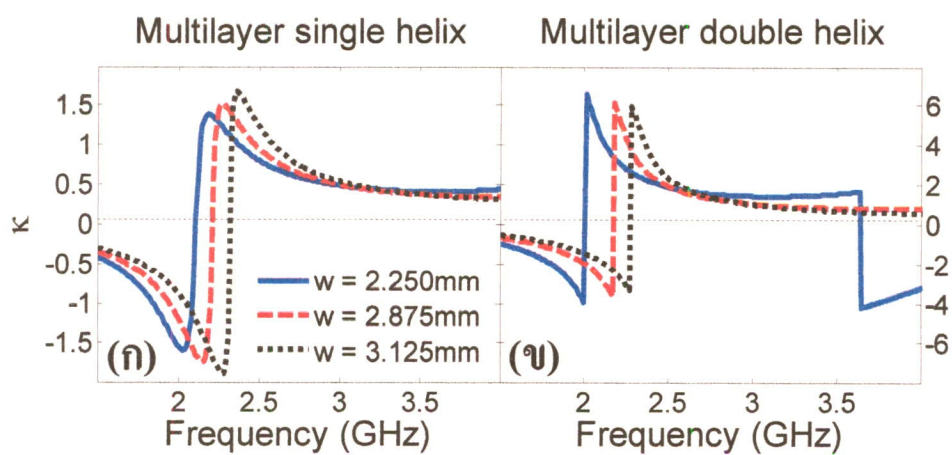


รูปที่ 2.8 การปรับ w เมื่อ (ก) และ (ข) คือสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (ค) และ (ง) ดัชนีหักเห (จ) และ (ฉ) การสูญเสีย ของ RCP และ LCP ตามลำดับ สำหรับ Multilayer 3D single helix

รูป 2.10 แสดงการเปรียบเทียบค่าไคเรลระหว่างโครงสร้าง Multilayer 3D single และ double helix เมื่อปรับเปลี่ยนความกว้างของตัวนำ โดยรูป 2.10 (ก) เป็นโครงสร้าง Multilayer 3D single helix และ รูป 2.10 (ข) เป็นโครงสร้าง Multilayer 3D double helix เมื่อความกว้างของตัวนำเพิ่มขึ้นจะทำให้จุดที่ค่าไคเรลเปลี่ยนจากลบเป็นบวกนั้นเลื่อนขวา สำหรับโครงสร้าง Multilayer 3D single helix ในขณะที่ Multilayer 3D double helix นั้นก็มีลักษณะเช่นเดียวกันกับ single helix



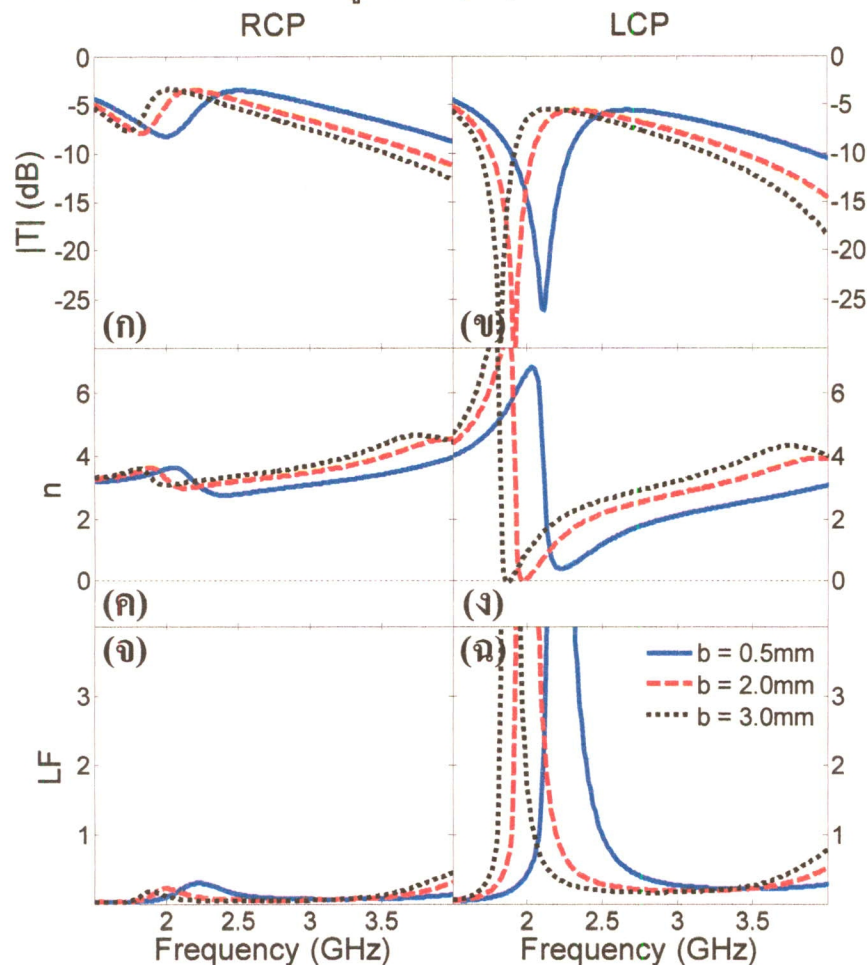
รูปที่ 2.9 การปรับ w เมื่อ (ก) และ (ข) คือสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (ค) และ (ง) ดัชนีหักเห (จ) และ (ฉ) การสูญเสีย ของ RCP และ LCP ตามลำดับ สำหรับ Multilayer 3D double helix



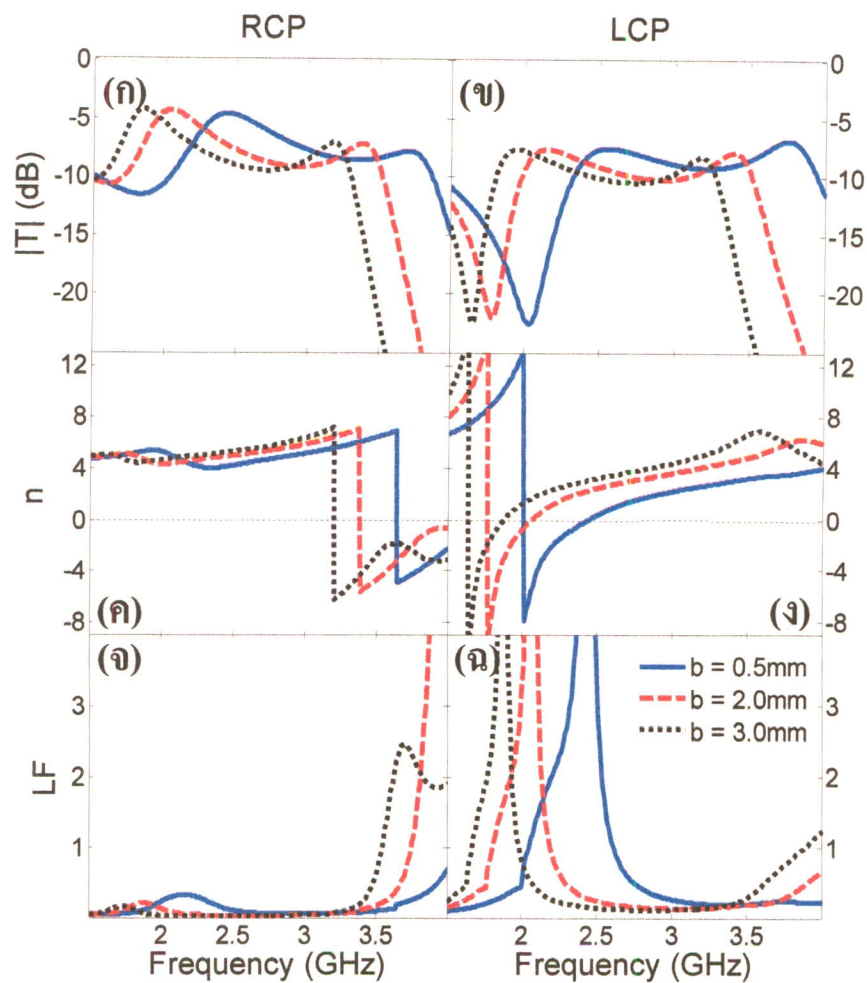
รูปที่ 2.10 การปรับ w เมื่อ (ก) และ (ข) คือค่าไคเรล สำหรับ Multilayer 3D single และ double helix ตามลำดับ

การปรับความยาวของส่วนที่เกิดการคับปลิง (Coupling length, b)

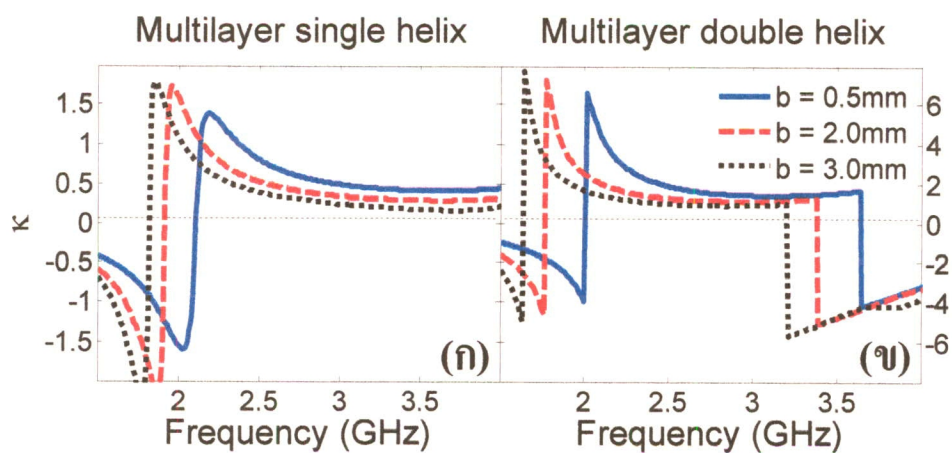
ในส่วนสุดท้ายของการศึกษา เราจะศึกษาการปรับความยาวของส่วนที่เกิดการคับปลิงระหว่างชั้นของโครงสร้าง โดยปรับจากเดิม 0.5mm เป็น 2.0mm และ 3.0mm รูปที่ 2.11 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ค่าดัชนีหักเห และค่าการสูญเสียของคลื่น RCP และ LCP ของโครงสร้าง Multilayer 3D single helix เมื่อส่วนของการคับปลิงเพิ่มขึ้น ทำให้การเกิดเรโซแนนซ์เลื่อนขวาหรือความถี่ต่ำลง สำหรับทั้งคลื่น RCP และ LCP แสดงดังรูป 2.11 (ก-ข) แต่ค่าแบนด์วิดท์นั้นลดลง การเพิ่ม b นั้น จะทำให้โครงสร้างมีความเป็น Homogenous มากขึ้น ในขณะที่ค่า n ของ RCP นั้นเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แสดงดังรูปที่ 2.11 (ค) ในขณะที่ค่า n ของคลื่น LCP นั้นเมื่อเพิ่มส่วนคับปลิงนั้น จะเข้าสู่ค่าดัชนีหักเหที่ติดลบ แสดงดังรูป 2.11(ง) และค่าการสูญเสียของทั้ง RCP และ LCP แสดงดังรูป 2.11 (จ-ฉ) ตามลำดับ



รูปที่ 2.11 การปรับ b เมื่อ (ก) และ (ข) คือสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (ค) และ (ง) ดัชนีหักเห (จ) และ (ฉ) การสูญเสีย ของ RCP และ LCP ตามลำดับ สำหรับ Multilayer 3D single helix



รูปที่ 2.12 การปรับ b เมื่อ (ก) และ (ข) คือสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (ค) และ (ง) ดัชนีหักเห (จ) และ (ฉ) การสูญเสีย ของ RCP และ LCP ตามลำดับ สำหรับ Multilayer 3D double helix



รูปที่ 2.13 การปรับ b เมื่อ (ก) และ (ข) คือค่าไคเรล สำหรับ Multilayer 3D single และ double helix ตามลำดับ

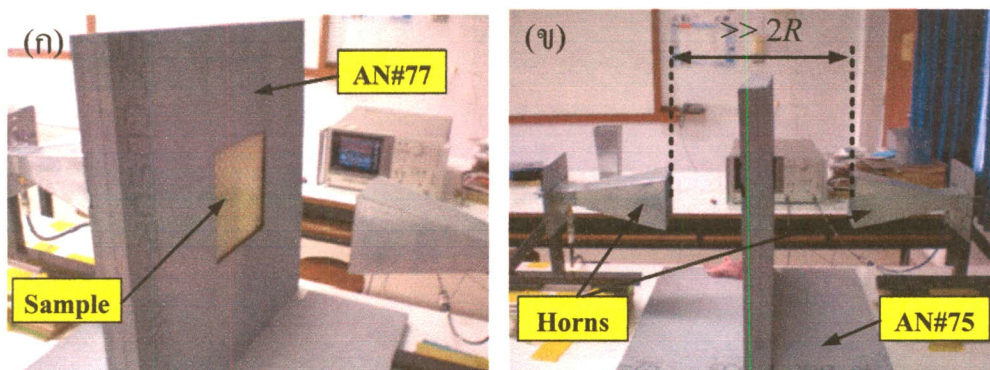
สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่า b ของโครงสร้าง Multilayer 3D double helix แสดงดังรูปที่ 2.12 โดยการเปลี่ยนแปลงของค่าต่างๆ เมื่อค่า b เพิ่มขึ้นนั้นเป็นไปในลักษณะที่คล้ายคลึงกันกับโครงสร้าง Multilayer 3D single helix โดยกราฟจะเลื่อนซ้ายหรือความถี่ต่ำลงเมื่อเพิ่มการคัปปลิงของโครงสร้าง รูปที่ 2.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าไคแรลเมื่อปรับความยาวของการคัปปลิง โดยรูปที่ 2.13 (ก) เป็นของโครงสร้าง Multilayer 3D single helix และรูป 2.13 (ข) ของโครงสร้าง Multilayer 3D double helix ซึ่งทั้งสองโครงสร้างมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกัน

เปรียบเทียบผลระหว่างผลการจำลองกับการวัดจริง

ในการวัดโครงสร้าง CMMs นั้นเราจะใช้วิธีการวัด Co- และ Cross- polarization จากนั้นจะคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและการส่งผ่านของทั้งคลื่น RCP และ LCP และคำนวณค่าคุณสมบัติต่างๆ ของโครงสร้าง

ขั้นตอนการทดลอง

การตั้งอุปกรณ์การทดลองแสดงดังรูปที่ 2.14 (ก-ข) โดยจะใช้ Vector network analyzer (HP8753D) ที่สามารถวัดได้ในช่วงความถี่ 300kHz - 6GHz ซึ่งสามารถวัดได้ทั้งเฟสและแอมพลิจูดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อน ใช้ Horn antennas ที่ได้ออกแบบไว้เป็นตัวส่งและตัวรับสัญญาณในช่วงความถี่ที่ต้องการวัด และใช้ Absorbers AN#77 เจะรูเพื่อใช้วางโครงสร้างที่ได้ออกแบบ และตัว Absorber ยังทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่ต้องการ จะทำให้เราได้ค่า S_{11} และ S_{21} ที่ถูกต้อง เป็นค่าที่ได้จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระทำกับโครงสร้างจริงๆ



รูปที่ 4.14 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

ใช้ Absorber AN#75 เพื่อเป็นตัวดูดซับและลดทอนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่อาจเกิดจากการสะท้อนของคลื่นกับโต๊ะ โดยระยะห่างระหว่างปาก Horn antennas ($>> 2R$) นั้นเท่ากับ

50cm หรือมีค่ามากกว่า 2 เท่าของระยะ Far field (R) หรือระยะจากปากฮอร์นถึงวัสดุควรมีค่ามากกว่าระยะ R เพื่อต้องการให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็น Plane wave โดยระยะ R นั้นวัดจากปาก Horn ถึงวัสดุที่เราต้องการวัด สามารถหาได้จาก

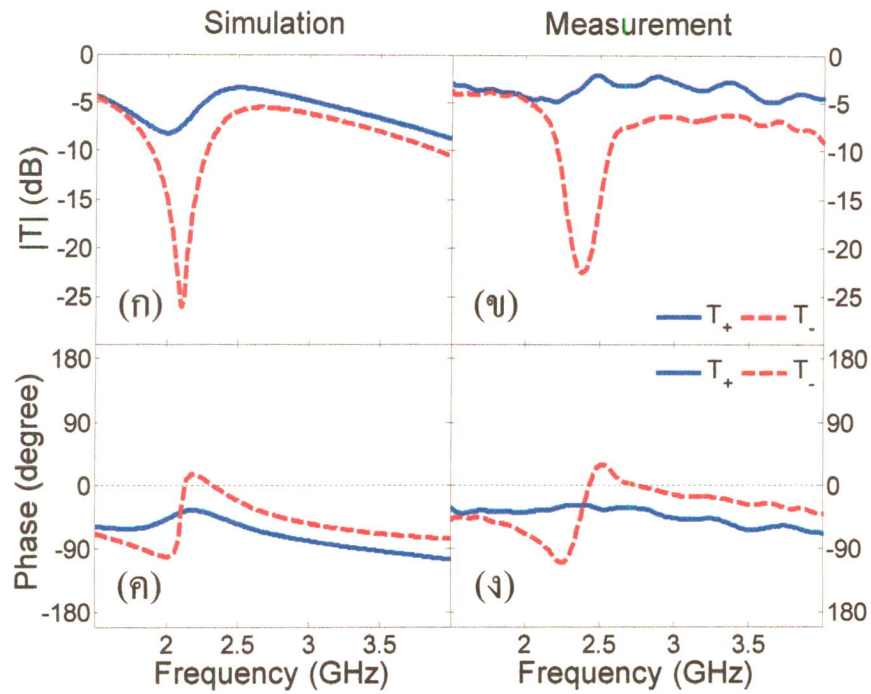
$$R \gg \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.1)$$

โดย D คือระยะความยาวของตัวส่ง ณ ที่นี้หมายถึงความยาวของปาก Horn ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.13m และ λ คือความยาวคลื่น เมื่อคิดถึงความถี่ที่เกิดเรโซแนนซ์คือที่ความถี่ 2GHz จะได้ $\lambda = c/f$ เมื่อ c คือความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/s จะได้ λ เท่ากับ 0.15m และเราสามารถคำนวณระยะ Far field ได้เท่ากับ 22.5cm นั่นคือจะต้องตั้งระยะระหว่างปาก Horn ถึงวัสดุมากกว่า 22.5cm หรือมากกว่าระยะ R ณ ที่นี้ใช้ระยะ 25cm ทำให้ได้ระยะจากปาก Horn จากตัวส่งถึงตัวรับเท่ากับ 50cm ซึ่งมีค่ามากกว่า $2R$ และการวัดด้วยเครื่อง HP8353D นั้น สามารถ Calibrate และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจะต้อง Normalize เทียบกับค่าที่ยังไม่มี Sample เพื่อให้ได้ค่า S_{21} ที่ถูกต้อง

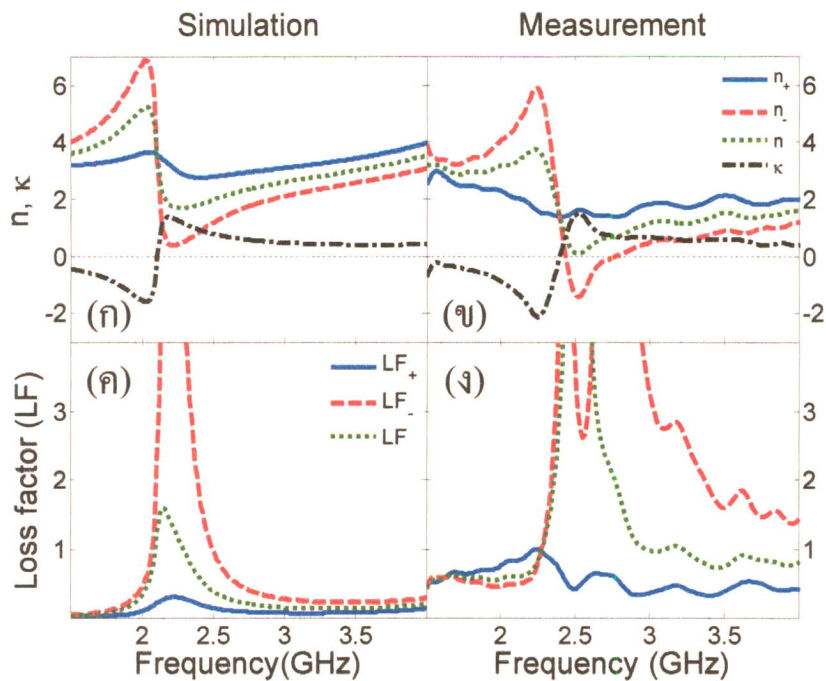
Multilayer 3D single helix

ผลการวัดสำหรับโครงสร้าง Multilayer 3D single helix แสดงดังรูปที่ 2.15 โดยเป็นการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองด้วยโปรแกรม CST กับผลวัดของแอมพลิจูดและเฟสของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่น RCP และ LCP ซึ่งแสดงดังรูป 2.15 (ก-ข) สำหรับแอมพลิจูดและรูป 2.15 (ค-ง) สำหรับเฟส โดยผลการจำลองนั้นจะเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 2.1GHz ที่ความถี่นี้คลื่น RCP (กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) จะสามารถส่งผ่านได้ ($< -7\text{dB}$) ในขณะที่คลื่น LCP (กราฟเส้นประสีแดง) นั้นจะไม่สามารถส่งผ่านออกมาได้ (-25dB) ในขณะที่ผลวัดพบว่าเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 2.4GHz ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนจากผลการจำลอง อาจเนื่องจากการสร้างโครงสร้างที่ยังไม่ตรงตามที่ได้สร้างจากโปรแกรม CST หรือการวัดด้วย Horn antennas ที่สร้างเอง

จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทั้งแอมพลิจูดและเฟส มาหาค่าคุณสมบัติต่างๆ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.16 โดยรูป 2.16 (ก-ข) แสดงค่าดัชนีหักเหและโคแวลของการจำลองและการวัดตามลำดับ และรูป 2.16 (ค-ง) แสดงค่า LF ของการจำลองและการวัดตามลำดับ โดยที่ความถี่เรโซแนนซ์ (2.1GHz) นั้นค่าดัชนีหักเหของ RCP และ LCP เป็นบวก และมีค่าเท่ากับ 3 และ 7 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 2.16 (ก) แต่ค่า LF ของ LCP นั้นมีค่าสูงนั้น หมายความว่าที่ความถี่ดังกล่าวคลื่น RCP สามารถผ่านได้



รูปที่ 2.15 ผลการจำลองเทียบกับผลวัด เมื่อ (ก) และ (ข) แอมพลิจูดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (ค) และ (ง) เฟสของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ของ Multilayer 3D single helix

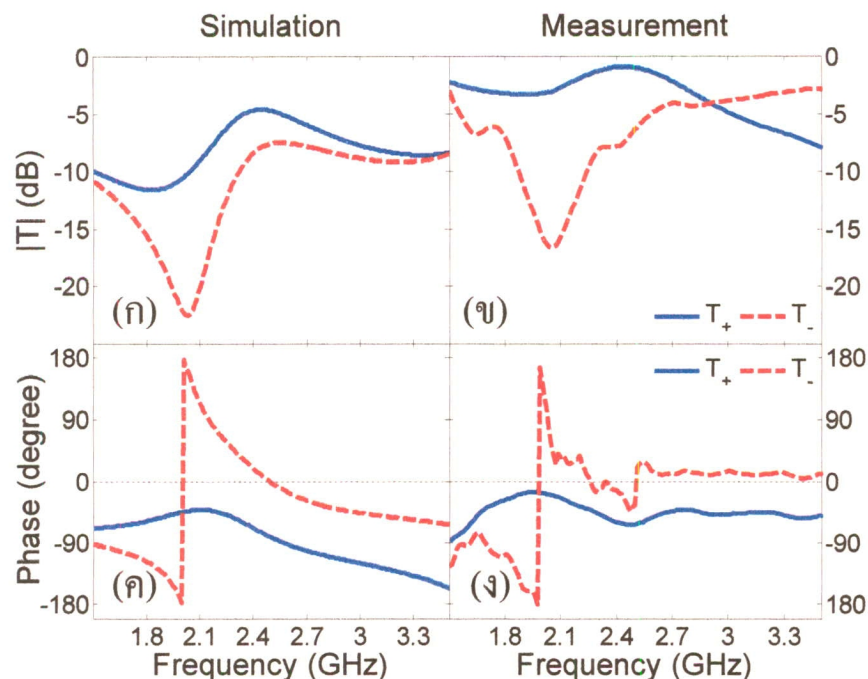


รูปที่ 2.16 ผลการจำลองเทียบกับผลวัด เมื่อ (ก) และ (ข) ดัชนีหักเหและไคลเรล (ค) และ (ง) การสูญเสีย ของ Multilayer 3D single helix

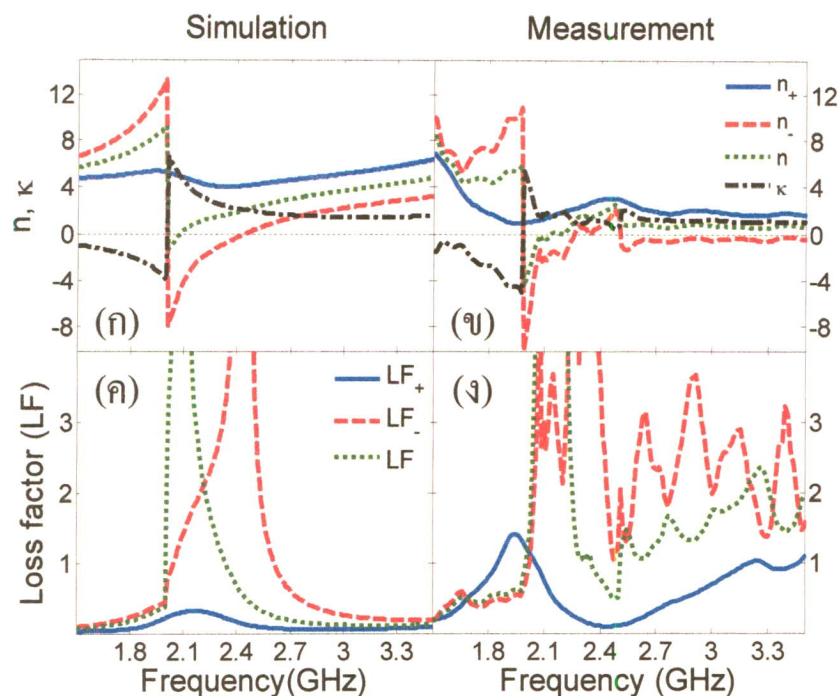
เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองด้วยโปรแกรม CST กับผลการวัดพบว่าการเปลี่ยนแปลงของลักษณะของคุณสมบัติต่างๆ นั้น มีความคล้ายคลึงกันแต่ทั้งค่าดัชนีหักเห ค่าไดเรล และค่าการสูญเสีย แต่มีค่าความผิดพลาดของความถี่ที่เกิดขึ้น และแอมพลิจูดของค่าต่างๆ เท่านั้น

Multilayer 3D double helix

สำหรับผลการจำลองและผลการวัด ของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่น RCP และ LCP ของโครงสร้าง Multilayer 3D double helix แสดงดังรูปที่ 2.17 โดยรูป 2.17 (ก-ข) แสดงแอมพลิจูด และรูป 2.17 (ค-ง) แสดงเฟส เมื่อพิจารณาที่แอมพลิจูดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของ RCP และ LCP พบว่าตำแหน่งที่เกิดเรโซแนนซ์ทั้งแบบจำลองและผลวัดมีความใกล้เคียงกัน ที่ความถี่ 2.08GHz โดยประมาณ โดยที่ความถี่นี้คลื่น RCP จะสามารถผ่านได้ ในขณะที่คลื่น LCP จะถูกบล็อก แต่แอมพลิจูดของผลวัดยังมีความคลาดเคลื่อนกับผลจำลองด้วยโปรแกรม CST ส่วนผลของเฟสของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของ RCP และ LCP พบว่าในช่วงความถี่ 1.5GHz - 2.4GHz โดยประมาณนั้น ผลการวัดมีความใกล้เคียงกับผลการจำลอง ส่วนที่ช่วงความถี่ 2.4GHz - 3.5GHz นั้นผลที่ได้ยังมีความคลาดเคลื่อนจากผลการจำลอง จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อน หาค่าคุณสมบัติของวัสดุนี้



รูปที่ 2.17 ผลการจำลองเทียบกับผลวัด เมื่อ (ก) และ (ข) แอมพลิจูดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (ค) และ (ง) เฟสของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ของ Multilayer 3D double helix



รูปที่ 2.18 ผลการจำลองเทียบกับผลวัด เมื่อ (ก) และ (ข) ดัชนีหักเหและไคเรล (ค) และ (ง) การสูญเสีย ของ Multilayer 3D double helix

รูป 2.18 แสดงผลการหาค่าคุณสมบัติของโครงสร้าง Multilayer 3D double helix โดยรูป 2.18 (ก-ข) แสดงค่าดัชนีหักเหและค่าไคเรลของผลการจำลองและผลการวัดตามลำดับ พบว่า ผลวัดค่าดัชนีหักเหของคลื่น RCP (กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) นั้นยังมีความคลาดเคลื่อนจากการจำลอง ส่วนค่าดัชนีหักเหของ LCP (กราฟเส้นประสีแดง) และค่าไคเรล (กราฟเส้นประ-ดอท สีดำ) มีความคลาดเคลื่อนกับการจำลองด้วยโปรแกรม CST ในขณะที่ค่า LF นั้น แสดงดังรูป 2.18 (ค-ง) นั้น มีค่าแอมพลิจูดที่คลาดเคลื่อนจากการจำลองด้วยโปรแกรม ในส่วนของลักษณะกราฟมีความใกล้เคียงกัน

2.2.2 โครงสร้าง Bi-layer Conjugated C_n

การศึกษาของการวางในแต่ละแบบและการปรับพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตของโครงสร้าง เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการโดยมีค่าดัชนีหักเหที่สูง และมีค่าการสูญเสียที่ต่ำ การคาดการณ์ช่วงการเกิดความถี่สั่นพ้องโดยใช้หลักการการวิเคราะห์วงจรหรือ Circuit Analysis โดยจะนำเสนอผลการศึกษาการปรับแต่งและการจัดวางของโครงสร้างเพื่อให้ได้คุณสมบัติไคเรล การศึกษาทุกโครงสร้าง C_n ทั้งนี้เพื่อต้องการตรวจสอบลักษณะแนวโน้มของ

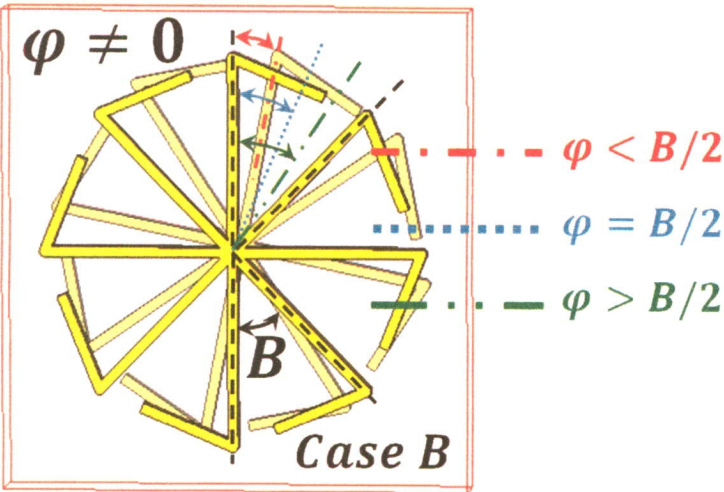
ค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Parameters) ที่เหมือนกัน และเป็นแนวทางนำไปสู่ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและค่าดัชนีหักเหที่สูง และมีค่าการสูญเสียที่ต่ำ

โครงสร้าง C_3-C_8 ถูกออกแบบโดยใช้โปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์ CST Microwave Studio® ซึ่งใช้หลักการวิธีผลต่างสืบเนื่องทางเวลา (Finite-Difference Time-Domain, FDTD) ในการจำลองได้ตั้งค่าให้มีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบคาบ (Periodic Boundary or a Unit Cell) โครงสร้างแบบคาบประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ทองแดง (Copper) และ ฐานรอง (Substrate) ชั้นระหว่างทองแดงทั้งสอง ฐานรองเป็น Arlon Di 880 (Lossy) มีค่า Dielectric Constant (ϵ_r) เท่ากับ 2.2 โครงสร้างที่ออกแบบมีความกว้างของทองแดง: $w = 2.8 \text{ mm}$ ความหนาฐานรอง: $s = 0.254 \text{ mm}$ ความหนาทองแดง: $t_m = 0.03 \text{ mm}$, $B = 360^\circ/n$, n คือจำนวนแกนหลัก (Main axis) และพารามิเตอร์ดังกล่าวนี้ถูกใช้ในทุแบบจำลอง

ในการจำลองทางคอมพิวเตอร์ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและส่งผ่านของคลื่นหมุนขวาและหมุนซ้าย (Transmission and Reflection Coefficients (S_{21}, S_{11}) of Right Circular Polarization (+) and Left Circular Polarization (-)) ถูกนำไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า [1-3] ผลพารามิเตอร์ดังกล่าวนี้มีความถูกต้องเนื่องจากถูกตรวจสอบโดยเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับบทความ [1,4] ในการศึกษาของการวางแต่ละแบบและการปรับพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตของโครงสร้าง C_n แบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

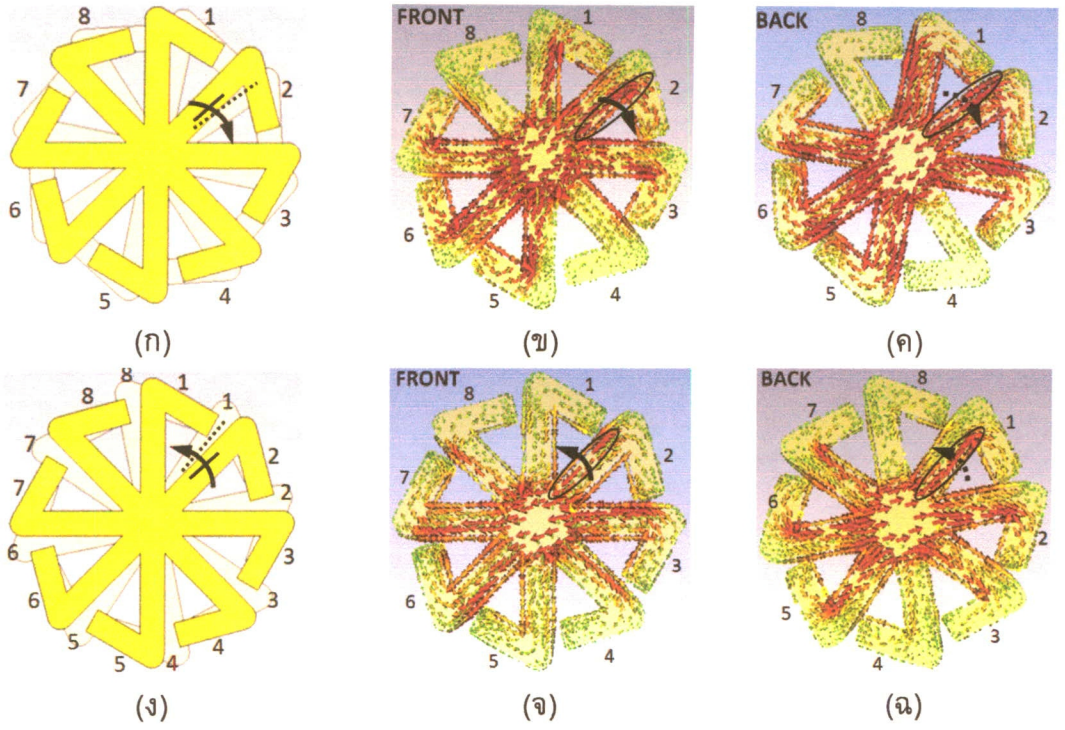
1) มุมระหว่างสองโครงสร้าง (Twisted angle: φ)

การศึกษามุมระหว่างสองโครงสร้าง (Twisted Angle: φ) ซึ่งมีผลต่อค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าโครงสร้างทั้งสองแบบที่ศึกษา คือ โครงสร้างที่มีทิศทางแกนเหมือนกันและโครงสร้างที่มีทิศทางแกนตรงกันข้ามกันโดยมุมระหว่างโครงสร้างไม่เท่ากับศูนย์ (Twisted: $\varphi \neq 0$) เพื่อให้ง่ายการเข้าใจตัวอย่างโครงสร้าง C_8 กรณีทิศทางแกนเหมือนกันแสดงดังรูปที่ 2.19 โครงสร้างทั้งสองแบบมีมุมระหว่างแกนหลักกับแกนย่อย (A) เท่ากับ 60 องศา อัตราส่วนความยาวแกนหลักกับแกนย่อย (H_1/H_2) เท่ากับ 0.5, $H_1 = 15.7 \text{ mm}$ การศึกษามุมระหว่างโครงสร้างนี้แบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ (1) $\varphi < B/2$ (2) $\varphi = B/2$ และ (3) $\varphi > B/2$ โดยเทียบกับมุมระหว่างสองแกนหลัก (Main Axis) ของโครงสร้าง ($B = 360/n$)

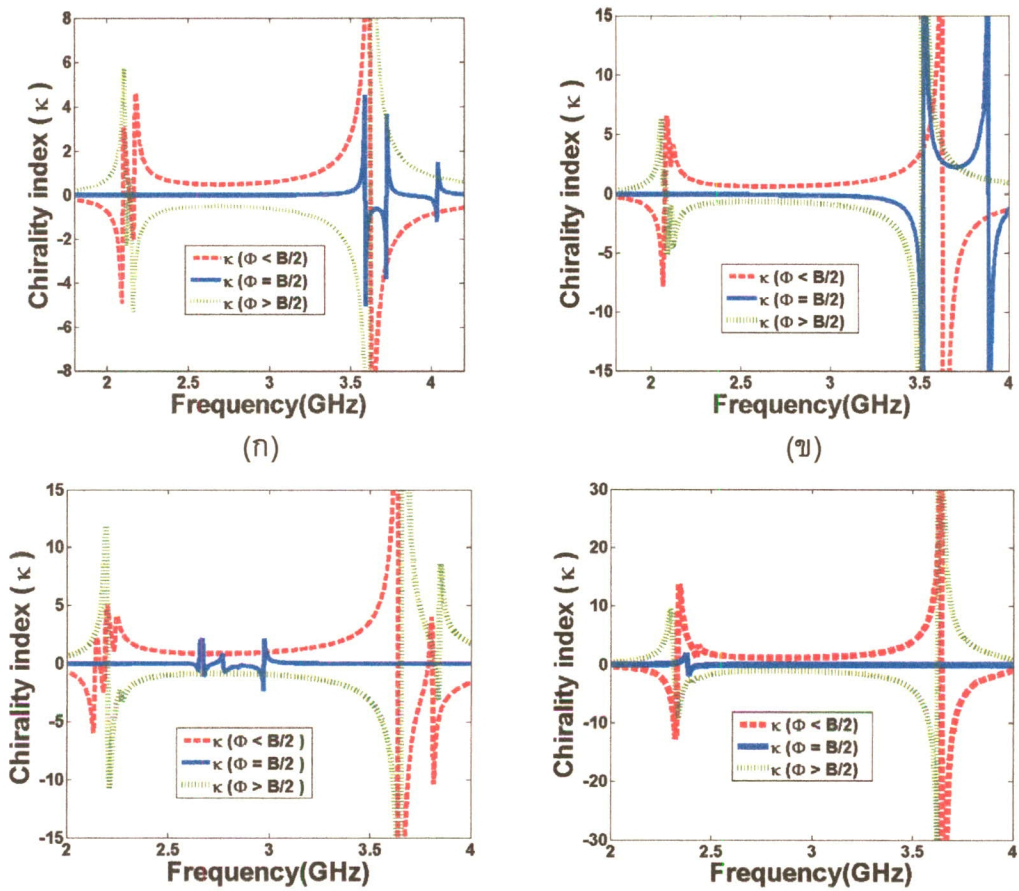


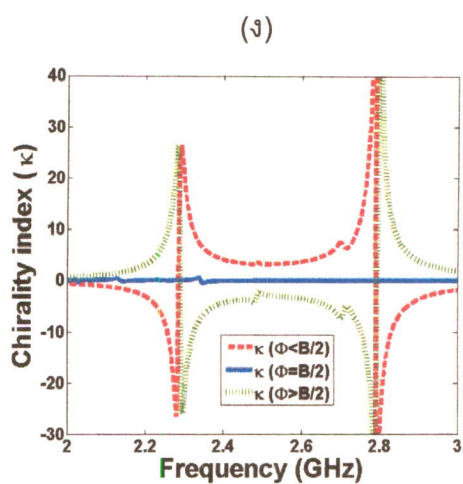
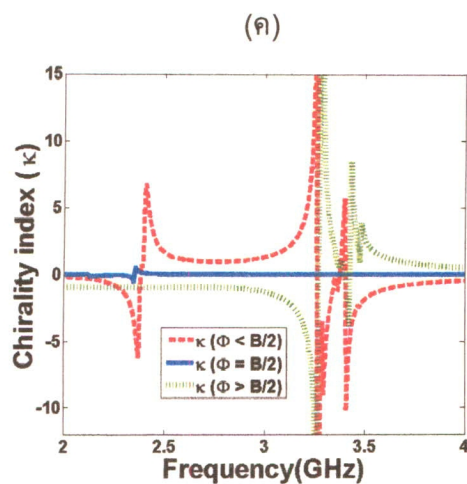
รูปที่ 2.19 ความแตกต่างของมุมระหว่างสองโครงสร้าง (Twisted Angle) สำหรับโครงสร้างที่มีทิศทางแขน เหมือนกัน โดยมุมระหว่างโครงสร้างไม่เท่ากับศูนย์ (Twisted : $\varphi \neq 0$)

การปรับพารามิเตอร์ของมุมระหว่างแกนหลัก (Twisted Angle: φ) ของโครงสร้างด้านบนและโครงสร้างด้านล่างที่มีทิศทางแขนเหมือนกัน มุมระหว่างแกนหลักนี้ส่งผลต่อค่าดัชนีโคแวลลิตี้ของโครงสร้าง C_3 - C_8 แสดงดังรูปที่ 2.21 โดยมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันคือ เมื่อ $\varphi < B/2$ แบนด์วิธ (Bandwidth) ของค่าดัชนีโคแวลลิตี้มีค่าเป็นบวก (Positive Value) และมีค่าเป็นลบ (Negative Value) เมื่อมุม $\varphi > B/2$ การสลับของขนาดโคแวลลิตี้ี้เนื่องจากทิศทางของ Current Coupling ในทิศทางตรงกันข้าม หมุนซ้าย (LH) สำหรับ $\varphi < B/2$ และ หมุนขวา (RH) สำหรับ $\varphi > B/2$ การเชื่อมโยงของกระแสดังกล่าวนี้แสดงดังรูปที่ 2.20 ขณะที่มุม $\varphi = B/2$ การเหนี่ยวนำรวมกันระหว่างสนามแม่เหล็ก (H) และสนามไฟฟ้า (E) ของกระแสบนสองตัวนำที่ขนานกันมีค่าต่ำกว่ากรณีที่มีมุม $\varphi < B/2$ และ $\varphi > B/2$ เพราะที่มุม $\varphi = B/2$ ระยะห่างระหว่างสองตัวนำมีค่าสูงสุดทำให้การกระทำร่วมกันระหว่างสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้ามีค่าต่ำ [4-7] ทำให้ค่าดัชนีโคแวลลิตี้มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ หรือไม่พบค่าดัชนีหักเหติดลบ



รูปที่ 2.20 แสดงทิศทางการแผ่รังสีของกระแสนวนโครงสร้างด้านหน้าและด้านหลังตามลำดับ กรณีสเกลเหมือนกันเมื่อมุม $\phi < B/2$ (ก-ค) และ $\phi > B/2$ (ง-ฉ)

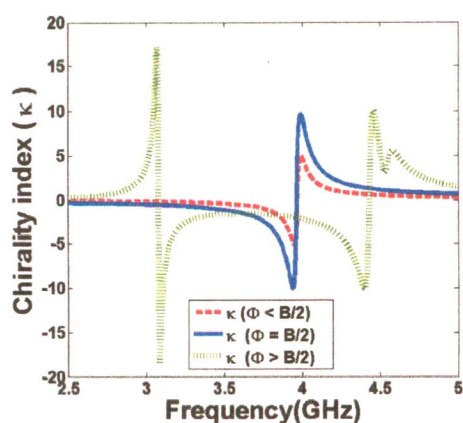




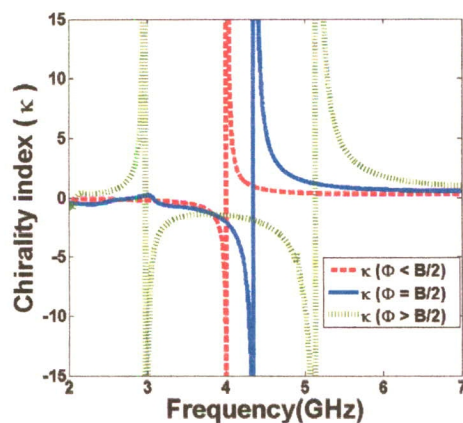
(จ)

(ฉ)

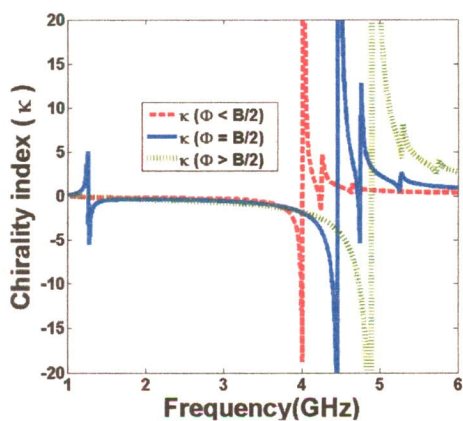
รูปที่ 2.21 แสดงค่าไครลิตีดีเมื่อมุม $\varphi < B/2$ $\varphi = B/2$ และ $\varphi > B/2$ ของโครงสร้าง C_3-C_8
(ก-ฉ) กรณีสถิตทางแกนเหมือนกัน



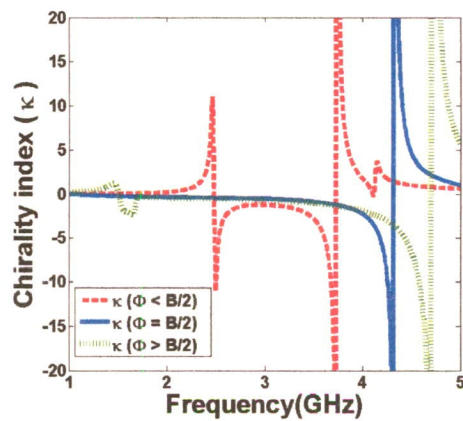
(ข)



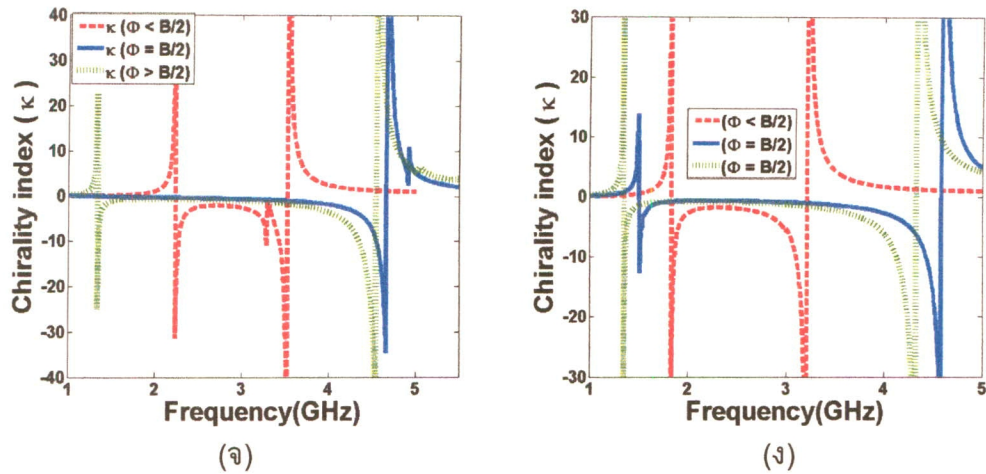
(ค)



(ง)

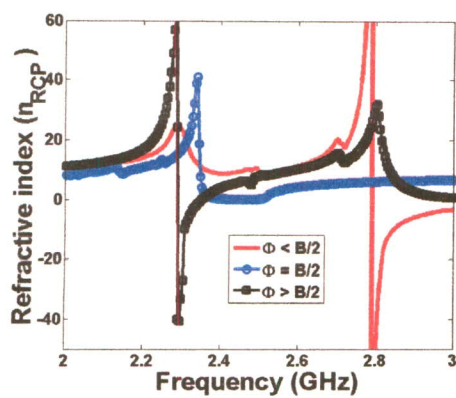


(จ)

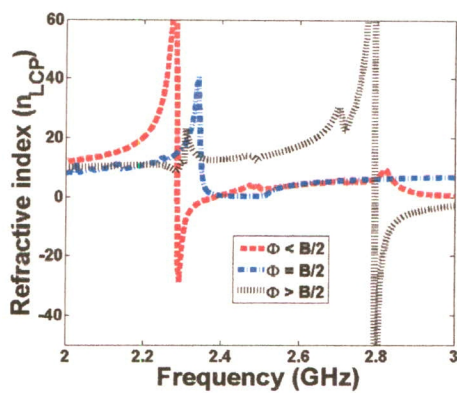


รูปที่ 2.22 แสดงค่าไครเรลลิตีเมื่อมุม $\varphi < B/2$ $\varphi = B/2$ และ $\varphi > B/2$ ของโครงสร้าง C_3 - C_8 (ก-ง) กรณีทิศทางแกนต่างกัน

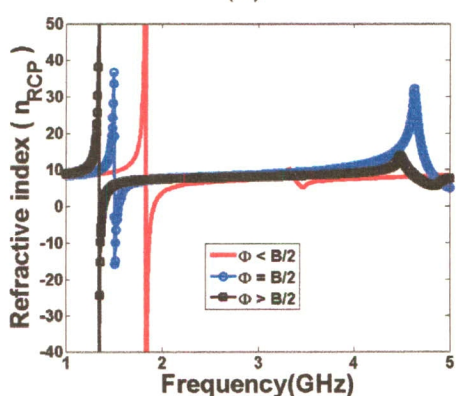
การปรับมุมระหว่างแกนหลัก (Twisted Angle: φ) ของสองโครงสร้างกรณีที่มีทิศทางตรงกันข้าม ค่าดัชนีไครเรลลิตีของโครงสร้าง C_3 - C_8 แสดงดังรูปที่ 2.22 (ก-ง) ค่าไครเรลลิตีแต่ละโครงสร้าง C_n มีลักษณะแนวโน้มที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างหลายองค์ประกอบ อาทิเช่น ความยาวแขนย่อย (H_2) มุมระหว่างแกนหลัก (B) และมุมระหว่างแกนหลักกับแขนย่อย (A) พารามิเตอร์ดังกล่าวนี้ถูกตั้งค่าให้เหมือนกรณีทิศทางแกนเหมือนกัน มุมระหว่างสองโครงสร้าง (φ) และความยาวแขนย่อยจะเชื่อมโยงกับมุมระหว่างแกนหลัก (B) อย่างไรก็ตามเมื่อค่าดังกล่าวคงที่ ช่วงกว้างสมบรูณ์ของค่าดัชนีไครเรลลิตีที่มุม $\varphi > B/2$ สำหรับโครงสร้าง C_3 และ C_4 ในขณะที่มุม $\varphi < B/2$ สำหรับโครงสร้าง C_6 - C_8 เนื่องจากมุม B มีค่าลดลงตามจำนวนแกนหลัก(n) ดังนั้นการปรับมุมระหว่างโครงสร้างทั้งสอง (φ) กรณีที่มีทิศทางแกนเหมือนกันค่าดัชนีไครเรลลิตีในแนวโน้มที่เหมือนกันทุกโครงสร้าง C_n ขณะที่กรณีที่มีทิศของแกนตรงกันข้ามกันนั้นค่าดัชนีไครเรลลิตีมีแนวโน้มที่แตกต่างกันทุกโครงสร้าง C_n เนื่องจากขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของโครงสร้างที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ผลของค่าดัชนีหักเหของคลื่นหมุนซ้ายและหมุนขวา (n_{LCP} , n_{RCP}) ของทุกโครงสร้าง C_8 กรณีที่มีทิศทางแกนเหมือนกันและตรงกันข้ามกัน แสดงดังรูปที่ 2.23 กรณีที่มีทิศทางแกนเหมือนกันสำหรับ $\varphi < B/2$ (รูปที่ 2.21 (ก) สีแดง) ค่าดัชนีไครเรลลิตีบวก (+) แสดงว่า $|n_{RCP}| > |n_{LCP}|$ จะพบว่าค่าดัชนีหักเหของคลื่นหมุนขวามีค่าเป็นบวกและค่าดัชนีหักเหของคลื่นหมุนซ้ายมีค่าเป็นลบกลับกันที่มุม $\varphi > B/2$ (รูปที่ 2.21 (ก) สีเขียว) ค่าดัชนีไครเรลลิตีมีเครื่องหมายลบ (-) ทำให้ค่าดัชนีหักเหมีลักษณะตรงกันข้ามกับกรณี $\varphi < B/2$ สุดท้าย สำหรับ $\varphi = B/2$ ค่าดัชนีไครเรลลิตีเข้าใกล้ศูนย์ ทำให้ค่าดัชนีหักเหของคลื่นหมุนขวาและหมุนซ้ายมีค่าเท่ากันและมีค่าเป็นบวก



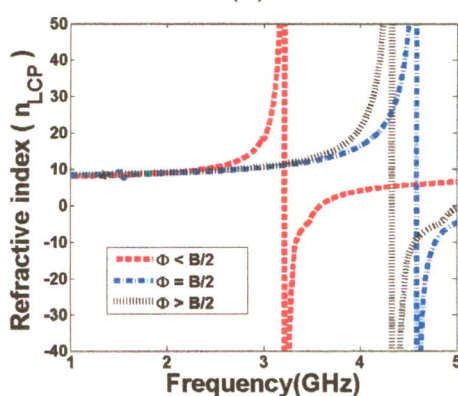
(ก)



(ข)



(ค)



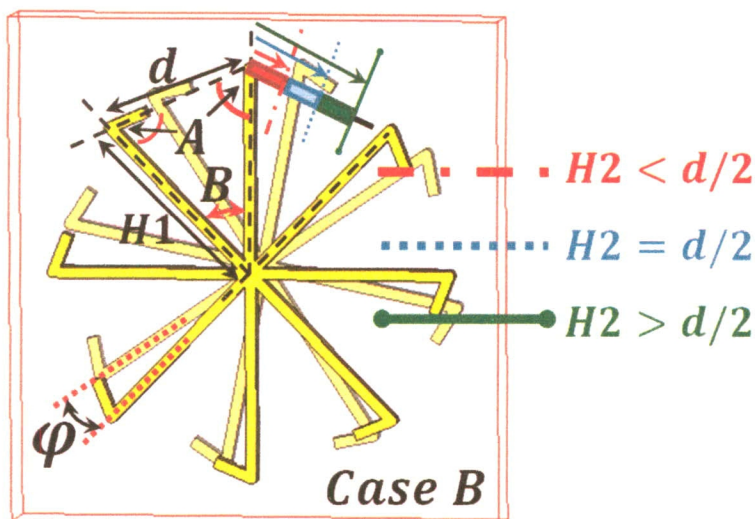
(ง)

รูปที่ 2.23 ค่าดัชนีหักเหคลื่นหมุนซ้ายและหมุนขวาของโครงสร้างที่มี (ก-ข) ทิศทางแขนย่อยเหมือนกัน (ค-ง) แขนย่อยตรงกันข้ามกันโดยมุมระหว่างโครงสร้างไม่เท่ากับศูนย์

(Twisted: $\varphi \neq 0$)

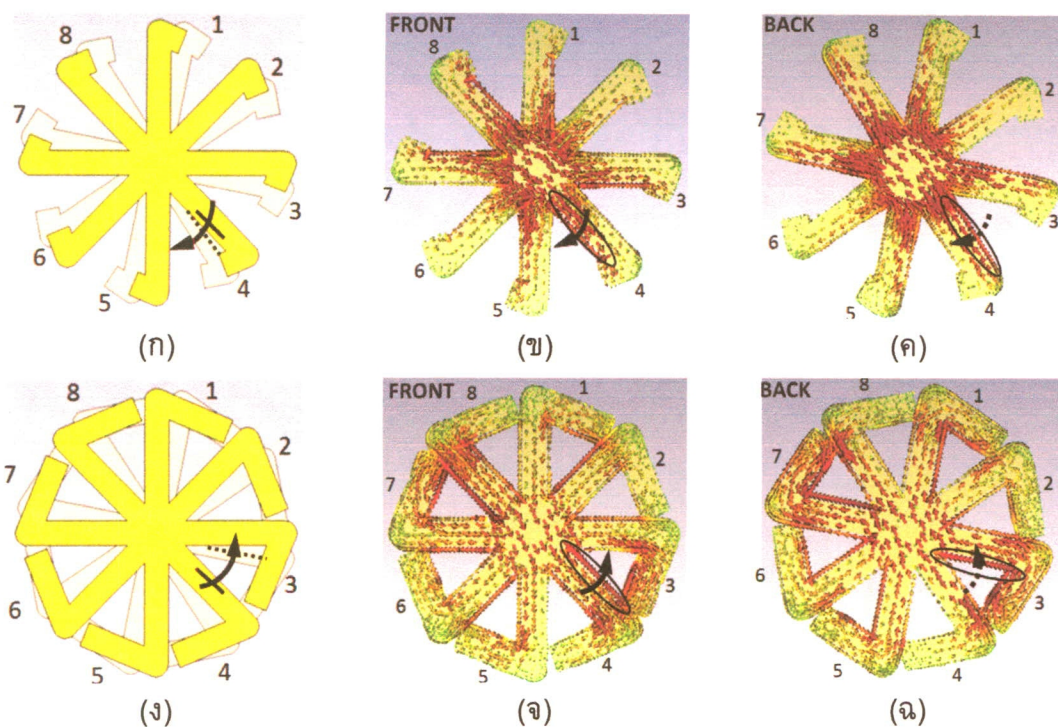
2) อัตราส่วนระหว่างแกนหลักกับแขนย่อย (H_1/H_2 Ratio)

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาขนาดของแขนย่อยที่มีผลต่อค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic parameters) กรณีการวางโครงสร้างสามแบบที่ศึกษา คือ (1) กรณีทิศทางแขนเหมือนกัน (2) กรณีทิศทางแขนตรงข้ามกันโดยมุมของแกนหลักระหว่างสองโครงสร้างไม่เท่ากับศูนย์ และ (3) กรณีทิศทางแขนตรงข้ามกันโดยมุมของแกนหลักระหว่างสองโครงสร้างเท่ากับศูนย์ ทุกพารามิเตอร์ของโครงสร้าง C_n ในแต่ละแบบการวางประกอบด้วย (1) $\varphi < B/2$ (2) $H_1 = 15.7 \text{ mm}$ ขณะที่มุมระหว่างแกนหลักกับแขนย่อย (A) และความยาวแขน (H_2) ถูกกำหนดโดยทฤษฎีสามเหลี่ยมหน้าจั่ว (Theory of Isosceles Triangle) แสดงดังรูปที่ 2.24 สำหรับโครงสร้างที่มีทิศทางแขนเหมือนกันและมุมระหว่างสองโครงสร้างไม่เท่ากับศูนย์ของโครงสร้าง C_8 อย่างไรก็ตามทฤษฎีสามเหลี่ยมหน้าจั่วจะถูกประยุกต์กับอีกสองแบบการวางสำหรับพารามิเตอร์ A และ H_2 ในทุกโครงสร้าง C_n กำหนดโดย $A = (180 - B)/2$, $d/2 = \sqrt{H_1^2 - (H_1 \cos(B/2))^2}$ โดยที่แขนทั้งสองโครงสร้างถูกแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 แบบย่อยคือ (1) $H_2 < d/2$ (2) $H_2 = d/2$ และ (3) $H_2 > d/2$

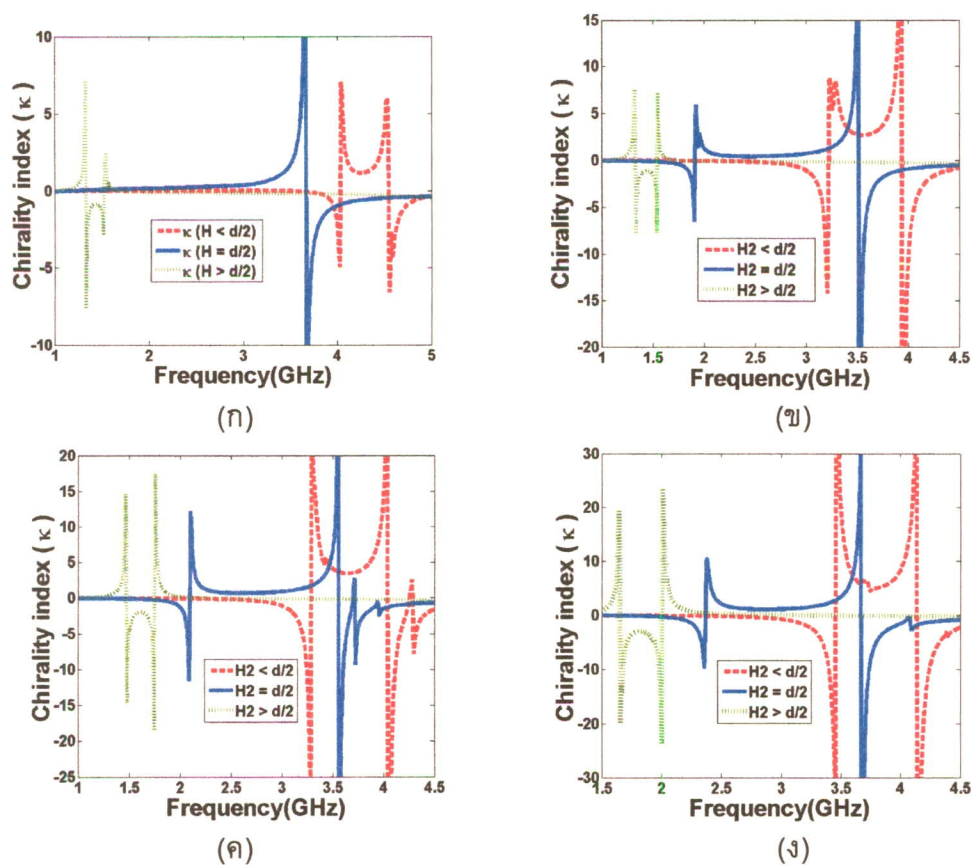


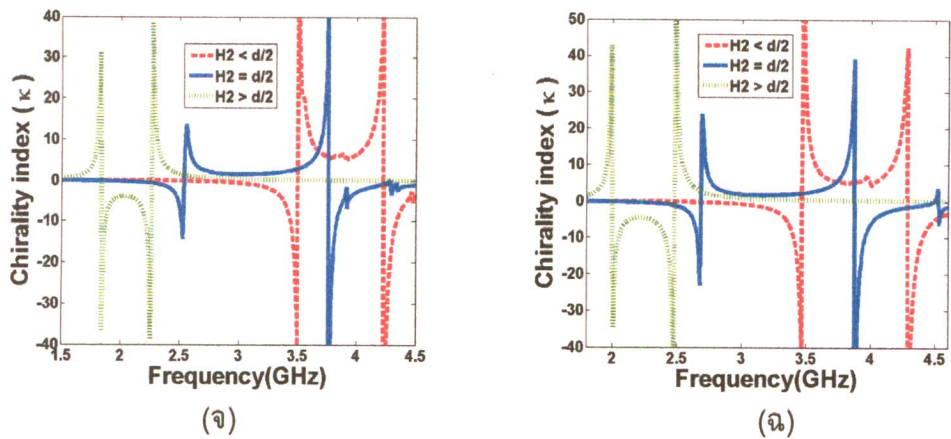
รูปที่ 2.24 ขนาดของแขนที่แตกต่างกับทฤษฎีสามเหลี่ยมหน้าจั่ว (Theory of Isosceles Triangle) ของโครงสร้าง C_8 กรณีที่ทิศทางแขนเหมือนกันมุมระหว่างแกนหลักของสองโครงสร้างไม่เท่ากับศูนย์ (Twisted : $\varphi \neq 0$)

ขนาดของแขนย่อย (H_2) ของโครงสร้าง C_3 - C_8 ที่มีผลต่อค่าดัชนีไครลิตี แสดงดังรูปที่ 2.25 กรณีโครงสร้างทั้งสองที่มีทิศทางแขนเหมือนกันมุมระหว่างโครงสร้างไม่เท่ากับศูนย์ (Twisted : $\varphi \neq 0$) (รูปที่ 2.24) ขนาดแขนย่อยสามารถควบคุมคุณลักษณะของค่าดัชนีไครลิตี อาทิเช่น (1) ตำแหน่งสองเรโซแนนซ์ (2) เครื่องหมายค่าดัชนีไครลิตี ตำแหน่งทั้งสองเรโซแนนซ์สามารถควบคุมเมื่อความยาวแขนย่อยเพิ่มขึ้นการเรโซแนนซ์ของค่าดัชนีไครลิตีจะเลื่อนจากความถี่สูงสำหรับ $H_2 < d/2$ ไปความถี่ต่ำลงเมื่อแขนย่อย $H_2 = d/2$, $H_2 > d/2$ ตามลำดับ ผลดังกล่าวนี้เกิดเนื่องจากความเหนียวและตัวเก็บประจุที่เพิ่มขึ้นระหว่างแขนย่อย รวมถึงขนาดของค่าดัชนีไครลิตีเป็นค่าบวก (Positive Value) สำหรับ $H_2 < d/2$ และเป็นค่าลบ (Negative Value) สำหรับ $H_2 > d/2$ การสลับของขนาดไครลิตีเนื่องจากการเปลี่ยนแกนของ Current Coupling จาก LH เปลี่ยนเป็น RH เมื่อแขนย่อยที่ยาวขึ้นแสดงดังรูปที่ 2.25



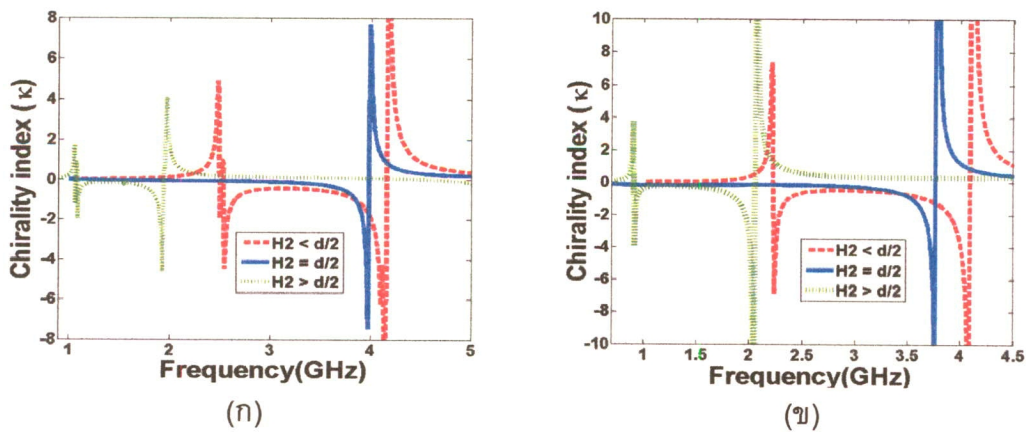
รูปที่ 2.25 แสดงทิศทางการกระแสน้ำของโครงสร้างด้านหน้าและด้านหลังตามลำดับ กรณีแบน
เหมือนกันมุม $\varphi < B/2$ เมื่อ $H_2 < d/2$ (ก-ค) และ $H_2 > d/2$ (ง-ฉ)

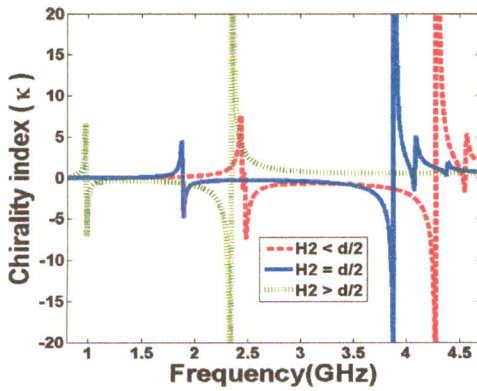




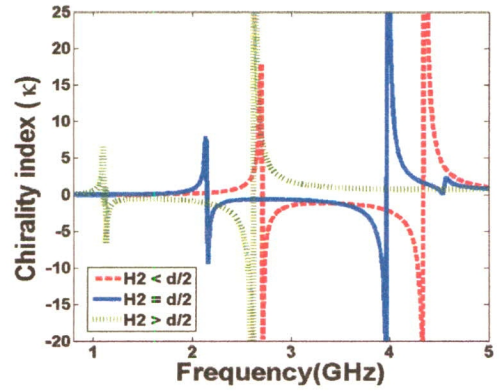
รูปที่ 2.26 แสดงค่าไครลิตีเมื่อขนาดแขนย่อย $H_2 < d/2$ $H_2 = d/2$ และ $H_2 > d/2$ ของโครงสร้าง C_3-C_8 (ก-ง) กรณี $\varphi < B/2$ และทิศทางแขนเหมือนกัน

สำหรับกรณีที่โครงสร้างมีทิศทางตรงข้ามกันมุมระหว่างสองแกนหลักของโครงสร้าง (Twisted Angle : $\varphi < B/2$) สองตำแหน่งเรโซแนนซ์ของค่าดัชนีไครลิตีที่มีลักษณะคล้ายกรณีที่แขนย่อยมีทิศทางเหมือนกัน คือ การเรโซแนนซ์ที่ความถี่สูงสำหรับ $H_2 < d/2$ โดยความถี่เลื่อนต่ำลงที่ $H_2 = d/2$, $H_2 > d/2$ ตามลำดับ ผลดังกล่าวนี้เกิดเนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่เพิ่มขึ้นเมื่อแขนย่อยยาวขึ้น ค่าดัชนีไครลิตีของโครงสร้างที่มีทิศทางตรงข้ามกันมุม $\varphi < B/2$ แสดงรูปที่ 2.27

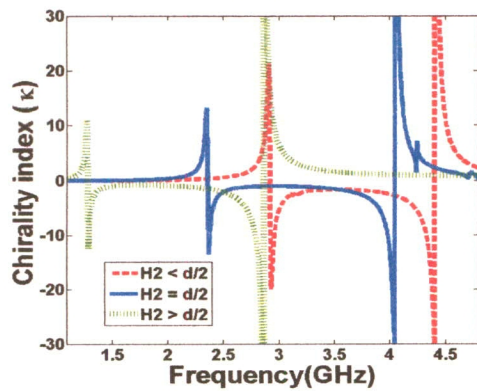




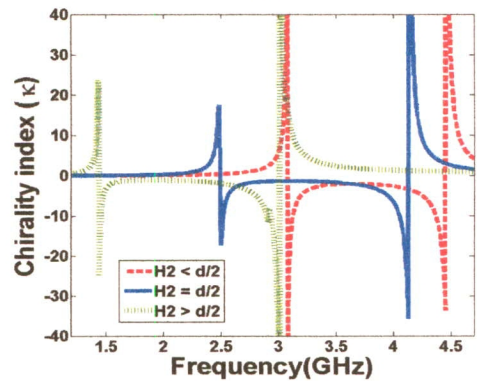
(ก)



(ง)



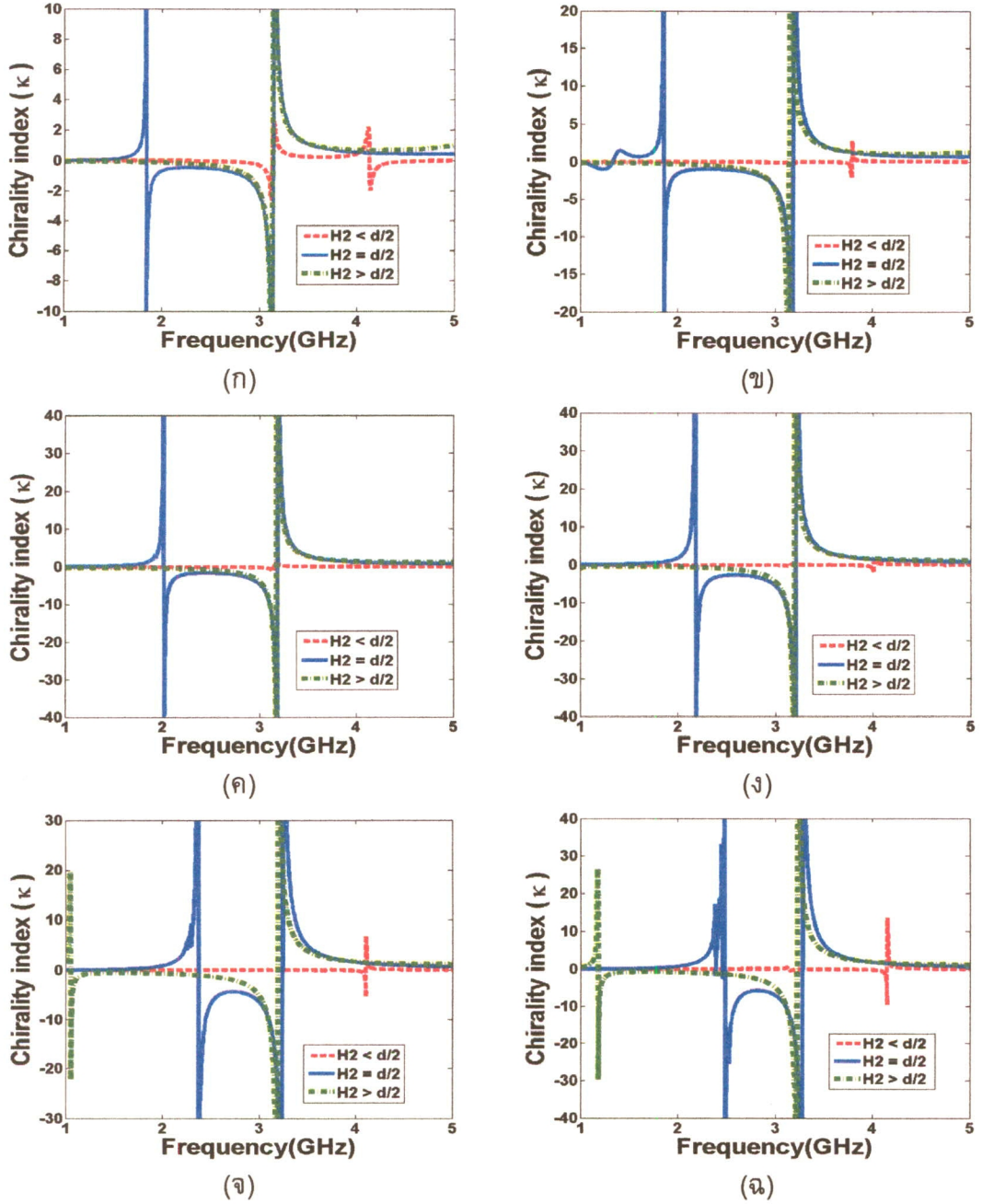
(จ)



(ฉ)

รูปที่ 2.27 แสดงค่าไครลลิตีเมื่อขนาดแขนย่อย $H_2 < d/2$ $H_2 = d/2$ และ $H_2 > d/2$ ของโครงสร้าง C_3 - C_8 (ก-ฉ) กรณี $\varphi < B/2$ และทิศทางแขนต่างกัน

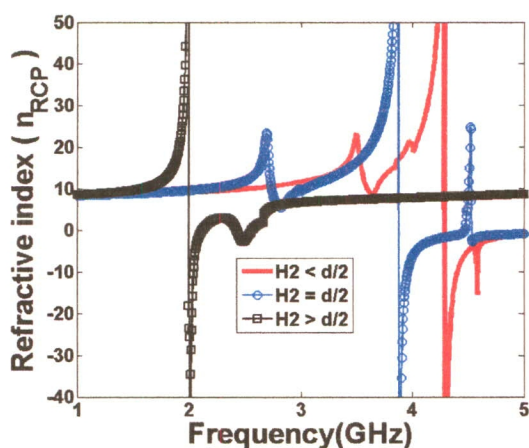
การวางในลักษณะสุดท้ายโครงสร้างมีทิศทางแขนย่อยตรงข้ามกันมุมระหว่างแกนหลักของสองโครงสร้างเท่ากับศูนย์ (Non-Twisted Angle: $\varphi = 0$) การวางโครงสร้างลักษณะนี้ขนาดแขนย่อยส่งผลต่อค่าดัชนีไครลลิตีมากกว่าสองกรณีข้างต้น ค่าดัชนีไครลลิตีของโครงสร้าง C_3 - C_8 แสดงดังรูปที่ 2.28 (ก-ฉ) ทุกโครงสร้าง C_n สำหรับกรณีที่ขนาดแขนย่อย $H_2 < d/2$ ค่าดัชนีไครลลิตีค่าต่ำในช่วง ± 2 เนื่องจากขนาดแขนย่อยที่เล็กนี้ทำให้คุณสมบัติการสะท้อนของอะตอมของโครงสร้าง (Superimposable Mirror Image) [8-9] มีค่าน้อยหรือมีความสมมาตรของโครงสร้างสูงกว่ากรณี $H_2 = d/2$ และ $H_2 > d/2$ สิ่งที่น่าสนใจสำหรับกรณีแขนย่อย $H_2 = d/2$ ค่าดัชนีไครลลิตีมีช่วงกว้างสมบูรณ์ กรณีสุดท้ายแขนย่อย $H_2 > d/2$ มีค่าดัชนีไครลลิตีแต่ช่วงกว้างมีลักษณะไม่สมบูรณ์ ตำแหน่งเรโซแนนท์แรกเลื่อนต่ำลงเนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามกรณี $H_2 = d/2$ เมื่อเพิ่มจำนวนแกนหลัก (n) สามารถควบคุมช่วงกว้างของแบนวิดธ์โดยช่วงแคบลงจากโครงสร้าง C_3 - C_8 ตามลำดับ



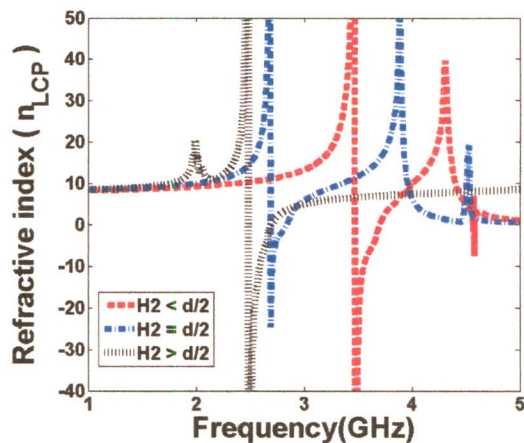
รูปที่ 2.28 แสดงค่าไครลิตีเมื่อขนาดแขนย่อย $H_2 < d/2$, $H_2 = d/2$ และ $H_2 > d/2$ ของโครงสร้าง C_3 - C_8 (ก-ฉ) กรณี $\varphi = 0$ และทิศทางแขนต่างกัน

สำหรับค่าดัชนีหักเหของคลื่นหมุนซ้ายและหมุนขวาถูกสังเกตเมื่อขนาดของแขนย่อยเพิ่มขึ้นจาก $H_2 < d/2$, $H_2 = d/2$ และ $H_2 > d/2$ ตามลำดับ ตัวอย่างค่าดัชนีหักเหของการวางทั้งสามแบบของโครงสร้าง C_8 แสดงดังรูปที่ 2.29 ค่าดัชนีหักเหติดลบปรากฏในทุกแบบการวางในขณะที่ยังตำแหน่งความถี่การเรโซแนนซ์ขึ้นอยู่กับขนาดของแขนย่อยโดยเรโซแนนซ์ที่มีความถี่สูงสำหรับ $H_2 < d/2$ ซึ่งเลื่อนต่ำลงเมื่อขนาดแขนย่อยเพิ่มขึ้น $H_2 = d/2$ และ $H_2 > d/2$ ตามลำดับ

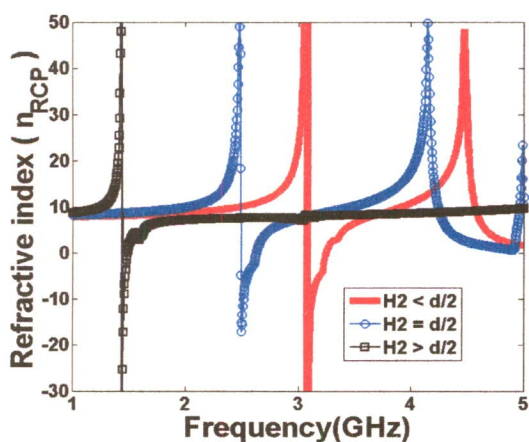
เนื่องจากการเพิ่มขนาดความยาวแขนย่อยเป็นการเพิ่มค่าความเหนียวนา (L) และตัวเก็บประจุ (C) และน่าสนใจจากกรณีทิศทางแขนย่อยเหมือนกันมุมระหว่างโครงสร้างไม่เท่ากับศูนย์ (Twisted: $\varphi \neq 0$) สองเรโซแนนท์ของค่าดัชนีหักเหิตดลสามารถเปลี่ยนสถานะของทิศทางคลื่นเมื่อขนาดของแขนเพิ่มขึ้น อาทิเช่น ช่วงเรโซแนนท์แรก (สีดำ) สำหรับคลื่นหมุนขวา ขณะที่ (สีแดง) เป็นคลื่นหมุนซ้าย เป็นต้น อย่างไรก็ตามสำหรับแขนย่อยตรงกันข้ามมุมระหว่างโครงสร้างเท่ากับศูนย์ (Non-Twisted: $\varphi = 0$) กรณี $H_2 < d/2$ ลักษณะแขนย่อยที่เล็กนี้ทำให้ค่าไดโพลีตี้เข้าใกล้ศูนย์และไม่พบค่าดัชนีหักเหิตดลซึ่งปรากฏในทุกโครงสร้าง C_n



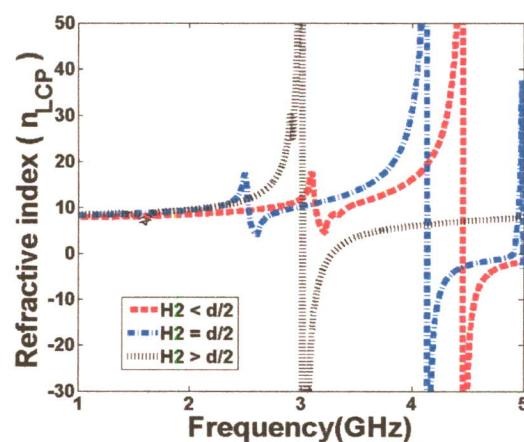
(ก)



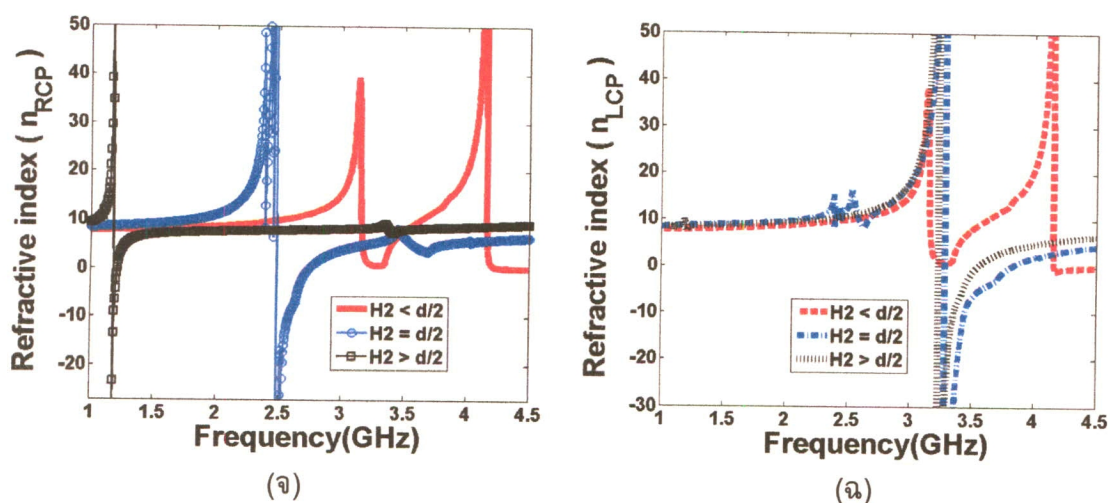
(ข)



(ค)



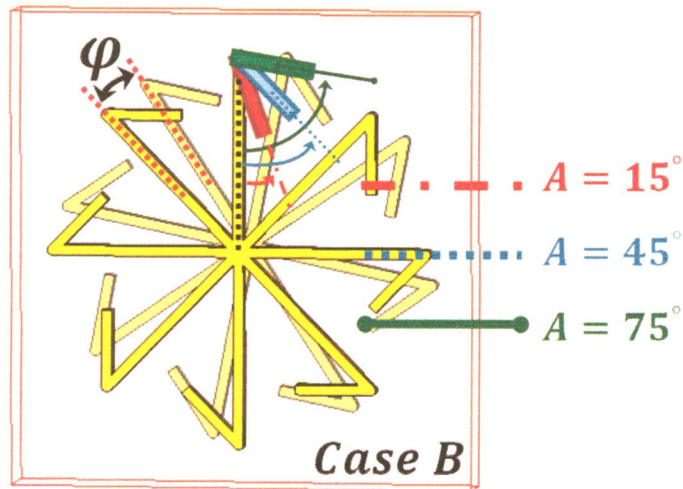
(ง)



รูปที่ 2.29 ค่าดัชนีหักเหคลื่นหมุนซ้ายและหมุนขวาเมื่อขนาดของแขนย่อย $H_2 < d/2$, $H_2 = d/2$ และ $H_2 > d/2$ ตามลำดับโครงสร้างที่มี (ก-ข) ทิศทางแขนย่อยเหมือนกัน (ค-ง) แขนย่อยตรงกันข้ามกันโดยมุมระหว่างโครงสร้างไม่เท่ากับศูนย์ (Twisted: $\varphi \neq 0$) และ (จ-ฉ) แขนย่อยตรงกันข้ามกันโดยมุมระหว่างโครงสร้างไม่เท่ากับศูนย์ (Non-Twisted: $\varphi = 0$)

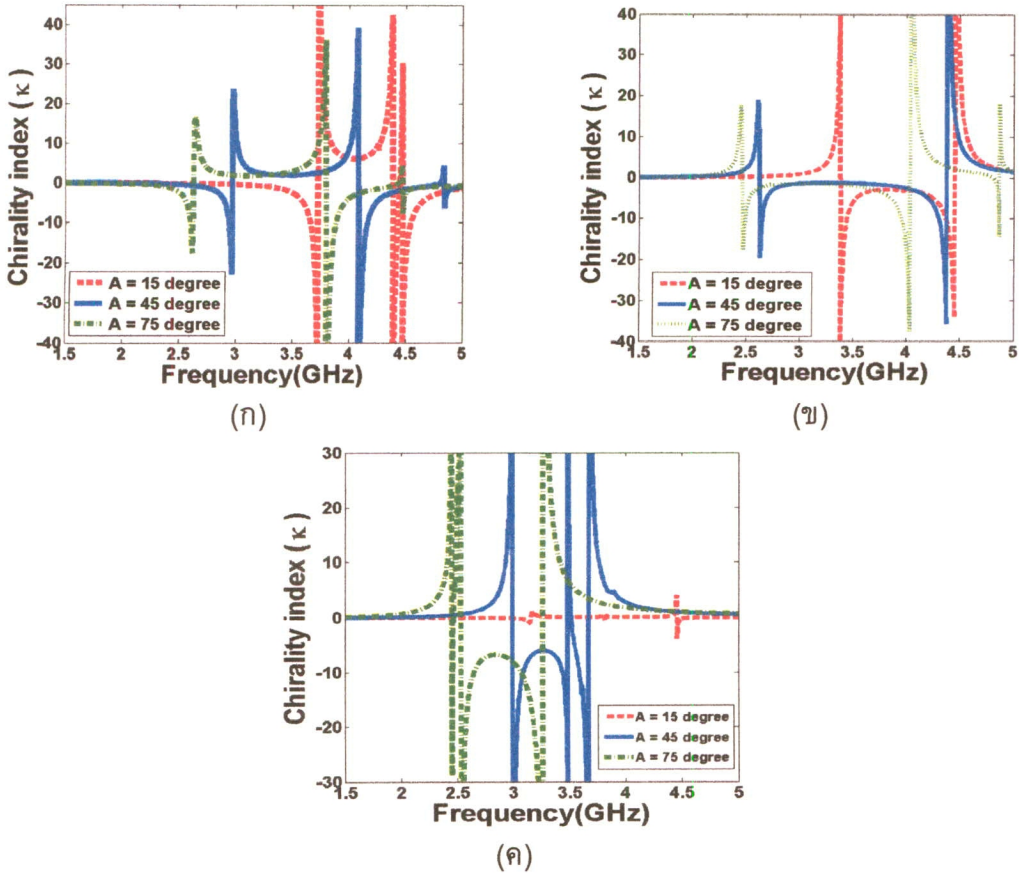
3) มุมระหว่างแกนหลักกับแขนย่อย (A)

พารามิเตอร์สุดท้ายของการศึกษาคือมุมระหว่างแกนหลักกับแขนย่อย (A) ของการวางทั้งสามแบบในโครงสร้าง C_3 - C_8 โดยขนาดของโครงสร้างในแต่ละแบบประกอบด้วย (1) มุม $\varphi < B/2$ สำหรับกรณีมุมของแกนหลักระหว่างสองโครงสร้างไม่เท่ากับศูนย์ (Twisted : $\varphi \neq 0$) (2) ขนาดของแขนย่อย $H_2 = d/2$ ขณะที่มุมระหว่างแกนหลักกับแขนย่อยถูกปรับจาก 15° , 45° และ 75° เพื่อศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ตัวอย่างการปรับมุม A ของโครงสร้าง C_8 กรณีทิศทางแขนเหมือนกันมุมระหว่างแกนหลักของสองโครงสร้างไม่เท่ากับศูนย์ ($\varphi < B/2$) แสดงดังรูปที่ 2.30 อย่างไรก็ตามพารามิเตอร์ดังกล่าวนี้จะถูกประยุกต์ใช้กับอีกสองลักษณะการวางด้วย



รูปที่ 2.30 ความแตกต่างของขนาดมุมระหว่างแกนหลักกับแขนย่อยของโครงสร้าง C_8 ของกรณีทิศทางแขนย่อยเหมือนกันมุมระหว่างสองโครงสร้างไม่เท่ากับศูนย์ (Twisted : $\varphi \neq 0$)

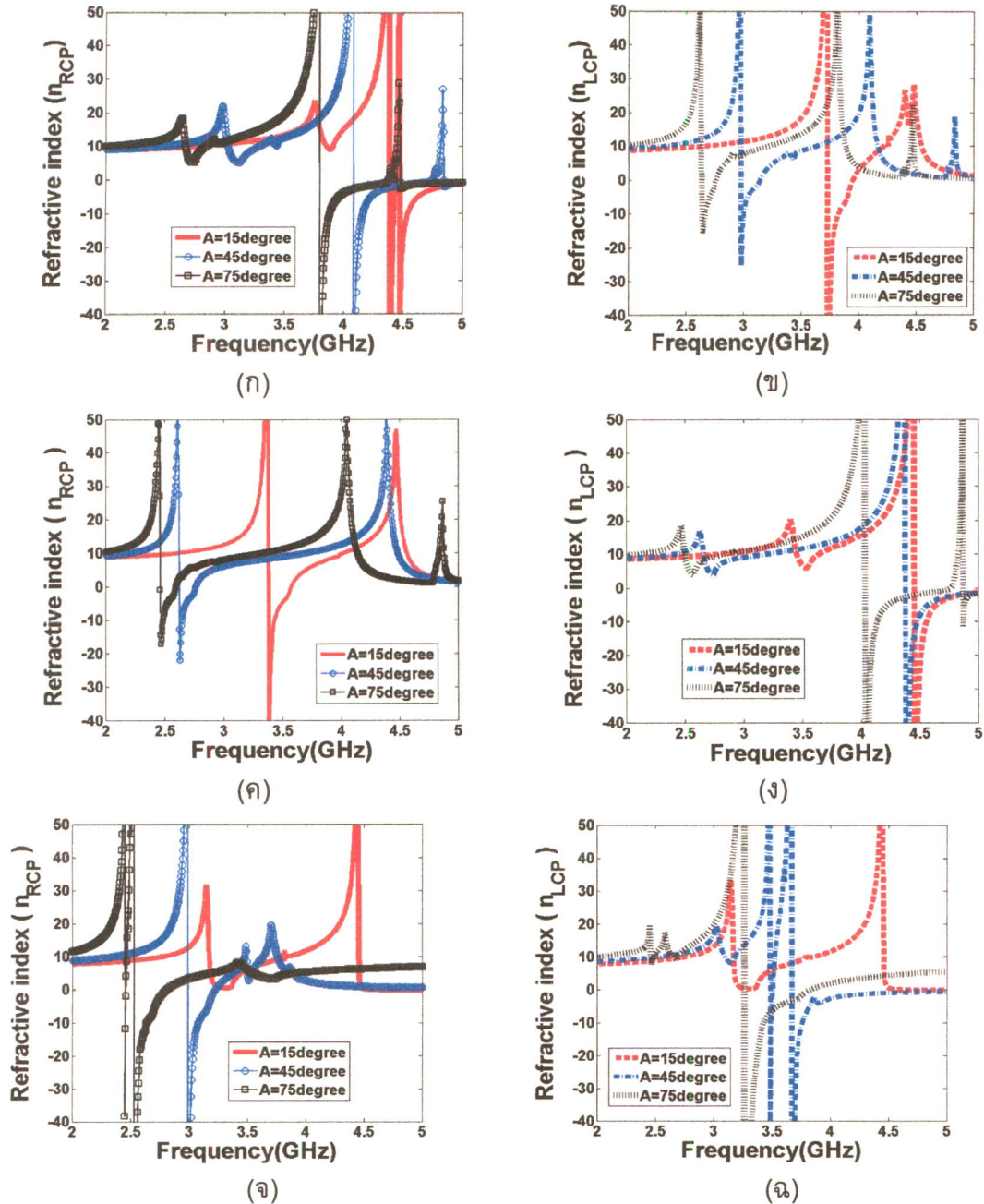
ค่าดัชนีโคแวลลิตี้ทั้งสามแบบการวางของโครงสร้าง C_8 สำหรับกรณีแขนย่อยที่มีทิศทางแขนย่อยเหมือนกันและตรงข้ามกันโดยมุมระหว่างสองโครงสร้างไม่เท่ากับศูนย์ (Twisted : $\varphi \neq 0$) (รูป 2.31 ก-ข) ทุกโครงสร้าง C_n มีแนวโน้มคล้ายกัน การปรับค่ามุมระหว่างแกนหลักกับแขนย่อย (A) ส่งผลต่อตำแหน่งแรกการเรโซแนนซ์ของดัชนีค่าโคแวลลิตี้โดยเลื่อนจากความถี่สูงไปยังความถี่ต่ำสำหรับมุม เท่ากับ 15, 45 และ 75 องศาตามลำดับ มุมดังกล่าวนี้ส่งผลต่อพื้นที่หน้าตัด ($w \times H_2$) ของแขนย่อยสองโครงสร้างเชื่อมโยงกับการกระทำร่วมกันระหว่างค่าสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า (Electric and Magnetic Field) ค่าดัชนีโคแวลลิตี้สำหรับกรณีทิศทางแขนย่อยตรงกันข้ามมุมระหว่างสองโครงสร้างเท่ากับศูนย์ ($\varphi = 0$) การวางโครงสร้างในลักษณะนี้แขนย่อยของโครงสร้างเท่านั้นที่สร้างคุณสมบัติโคแวลลิตี้โดยเชื่อมโยงกับการสะท้อนของอะตอมของโครงสร้าง (Superimposable Mirror Image) ซึ่งกรณี $A = 15^\circ$ ค่าดัชนีโคแวลลิตี้มีค่าต่ำ (± 3.9) สำหรับ A เท่ากับ 45 และ 60 องศา ค่าโคแวลลิตี้เลื่อนขวา (สีน้ำเงิน) ไปซ้าย (สีเขียว) เนื่องจากที่ทางออกทำให้สร้างตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นระหว่างแขนย่อยทั้งสองโครงสร้างกับทิศทางแขนที่ตรงกันข้าม



รูปที่ 2.31 ค่าไคลเรลลิตีโครงสร้าง C_8 ของการวางแต่ละแบบเมื่อมุมระหว่างแกนหลักกับแกนย่อยถูกปรับ กรณีมุมระหว่างสองโครงสร้างไม่เท่ากับศูนย์ (Twisted: $\varphi \neq 0$) โดยที่แกนย่อยมีทิศทาง (ก) เหมือนกัน (ข) ต่างกัน (ค) มุมระหว่างสองโครงสร้างเท่ากับศูนย์ (Non-Twisted: $\varphi = 0$) ทิศทางแกนย่อยต่างกัน

ค่าดัชนีหักเหของคลื่นหมุนซ้ายและหมุนขวาของทั้งสามแบบจะเชื่อมกับค่าไคลเรลลิตีทั้งสามแบบนี้จะมีขนาดของมุมระหว่างแกนหลักสองโครงสร้าง (φ) และขนาดแกนย่อย (H_2) ที่คงที่ดังที่กล่าวข้างต้น ขณะที่มุมระหว่างแกนหลักกับแกนย่อยถูกปรับจาก $A = 15^\circ, 45^\circ$ และ 75° ตามลำดับ ค่าดัชนีหักเหของการวางทั้งสามแบบของโครงสร้าง C_8 แสดงดังรูปที่ 2.32 (ก-ค) สำหรับกรณีทิศทางแกนย่อยเหมือนกันและตรงกันข้ามโดยมุมระหว่างโครงสร้างไม่เท่ากับศูนย์ ($\varphi < B/2$) ตำแหน่งแรกของค่าดัชนีหักเหติดลบสามารถควบคุมได้ สำหรับมุม A ที่ต่ำกับการเรโซแนนซ์ที่ความถี่สูง (สีแดง) ตรงกันข้ามเมื่อมุม A สูงขึ้นการเรโซแนนซ์จะเลื่อนสู่ช่วงความถี่ต่ำ (สีเขียว) เนื่องจากการเพิ่มขนาดของมุม A ทำให้ค่าตัวเก็บประจุ (C) ระหว่างแกนย่อยเพิ่มขึ้น สุดท้ายกรณีทิศทางแกนย่อยตรงกันข้ามมุมระหว่างโครงสร้างเท่ากับศูนย์ ($\varphi = 0$) สำหรับมุม A ที่ต่ำ (15 องศา) ค่าไคลเรลลิตีที่ต่ำ (เข้าใกล้ศูนย์) ทำให้ไม่พบค่าดัชนีหักเหติดลบ [10] ในขณะที่มุม 45 และ 60 องศา มีค่าดัชนีไคลเรลลิตี ($\kappa \neq 0$) ทำให้เกิดพบค่าดัชนีหักเห

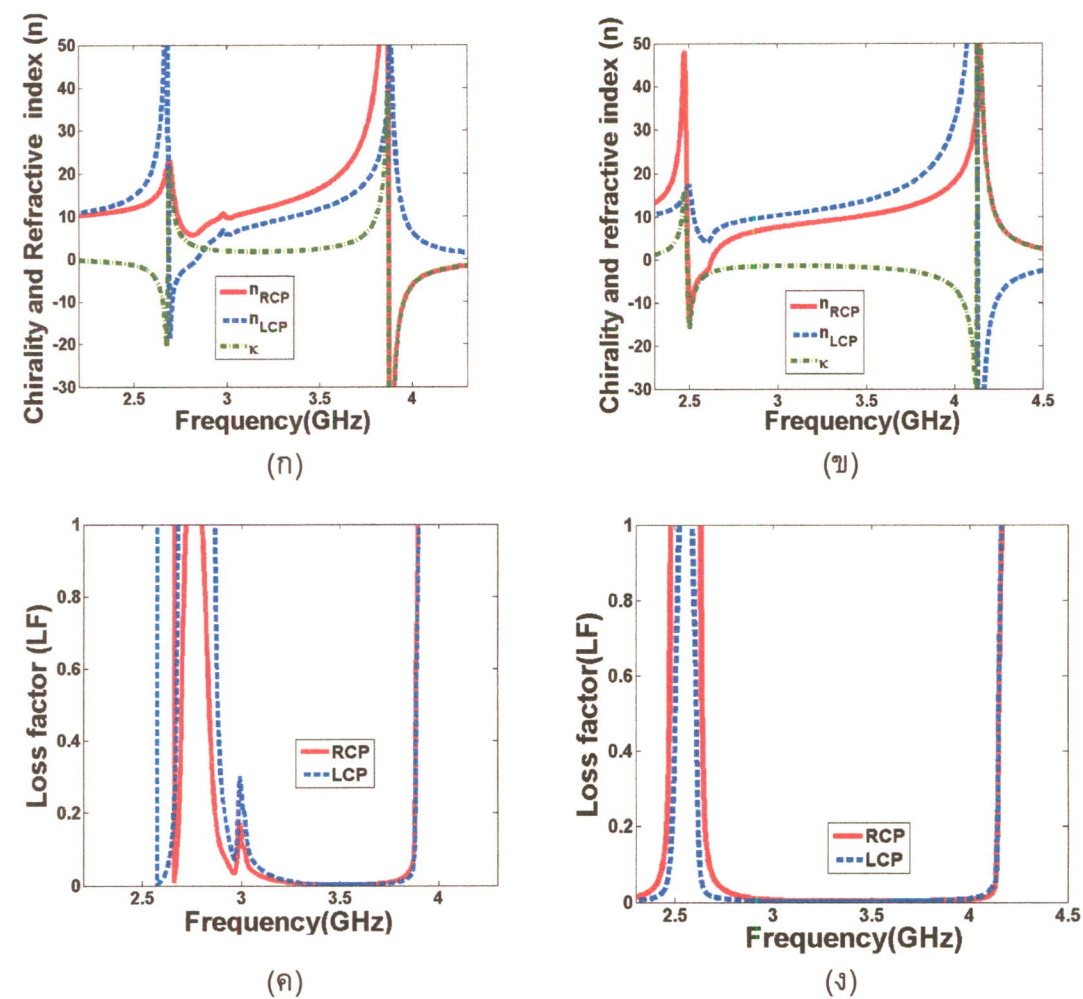
ติดลบ ในขณะที่การเลื่อนของแถบความถี่เลื่อนจากความถี่สูง (สีน้ำเงิน) ไปยังความถี่ต่ำ (สีเขียว) เนื่องจากค่าตัวเก็บประจุ (C) ระหว่างแกนหลักของแขนย่อยเพิ่มขึ้นตามลำดับ



รูปที่ 2.32 ค่าดัชนีหักเหของโครงสร้าง C_8 ของการวางแต่ละแบบเมื่อมุมระหว่างแกนหลักกับแขนย่อยถูกปรับ กรณีมุมระหว่างสองโครงสร้างไม่เท่ากับศูนย์ (Twisted: $\varphi \neq 0$) โดยที่แขนย่อยมีทิศทาง (ก-ข) เหมือนกัน (ค-ง) ต่างกัน (จ-ฉ) มุมระหว่างสองโครงสร้างเท่ากับศูนย์ (Non-Twisted: $\varphi = 0$) ทิศทางแขนย่อยต่างกัน

การวางกับค่าการสูญเสีย (Orientation vs. Loss Factor)

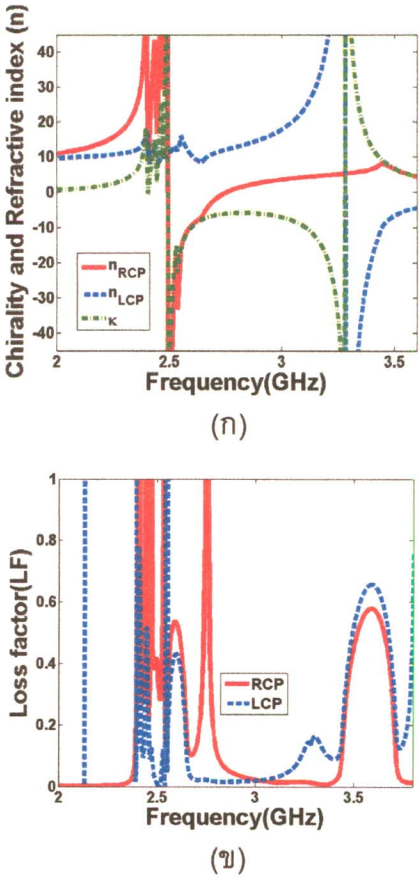
ค่าการสูญเสียของโครงสร้าง หรือ Loss Factor เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญอย่างยิ่งต่อการพิจารณาว่าโครงสร้างมีคุณสมบัติที่ดีหรือไม่ในช่วงแถบความถี่ผ่าน โดยงานวิจัยนี้ต้องการโครงสร้างที่มีค่าการสูญเสียที่ต่ำในช่วงที่ปรากฏค่าดัชนีหักเหติดลบ จากแบบจำลองจากโปรแกรมข้างต้นเลือกโครงสร้าง C_8 เนื่องจากค่าดัชนีโคเรลลิตี้และค่าดัชนีหักเหที่สูงส่งผลต่อค่าดัชนีหักเหที่สูงตามไปด้วย การศึกษาค่าการสูญเสียช่วงที่เกิดค่าดัชนีหักเหติดลบของการวางโครงสร้างทั้งสามแบบโดยขนาดของโครงสร้างไม่เปลี่ยนแปลงคือ $\varphi < B/2$, $A = 67.5^\circ$ และ $H_2 = d/2$ พบว่าในช่วงที่พบค่าดัชนีหักเหติดลบของการวางโครงสร้างหนึ่งในสามแบบนี้มีอัตราการสูญเสียของสัญญาณต่ำ หรือมีค่าในเทอมของจินตภาพของค่าดัชนีหักเหน้อยมาก (ใกล้เคียงกับศูนย์)



รูปที่ 2.33 ค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับค่าการสูญเสียของการวางโครงสร้าง C_8 มุมระหว่างสองโครงสร้างไม่เท่ากับศูนย์ (Twisted: $\varphi \neq 0$) กรณีทิศทางแขนเหมือนกัน: (ก) (ค) และกรณีตรงกันข้ามกัน (ข) (ง)

ค่าการสูญเสียของการวางโครงสร้างกรณีทิศทางแขนเหมือนกันและตรงกันข้ามกันโดยมุมระหว่างสองโครงสร้างไม่เท่ากับศูนย์ (Twisted: $\varphi < B/2$) ค่ามุมระหว่างแกนหลักกับแขนย่อย ($A = 67.5$) แสดงดังรูปที่ 2.33 (ค-ง) จะพบว่าการวางทั้งสองแบบนี้มีค่าการสูญเสียที่สูง (Loss Factor > 1) ผลดังกล่าวนี้เกิดจากความไม่สมมาตรของแกนหลักอันเนื่องมาจากมุมของโครงสร้างทั้งสอง (Twisted Angle) ในขณะที่กรณีทิศทางแขนตรงกันข้ามมุมระหว่างสองโครงสร้างเท่ากับศูนย์ (Twisted: $\varphi = 0$) การวางของโครงสร้างกรณีมีความสมมาตรของแกนหลัก ขณะที่อะตอมของแขนย่อยในทิศทางตรงกันข้ามสร้างคุณสมบัติโคเรลนำไปสู่ค่าดัชนีหักเหที่สูง ช่วงค่าดัชนีหักเหที่สูงกับค่าการสูญเสียมีค่าต่ำกว่า (Loss Factor < 1) แสดงดังรูปที่ 2.34 (ก-ข)

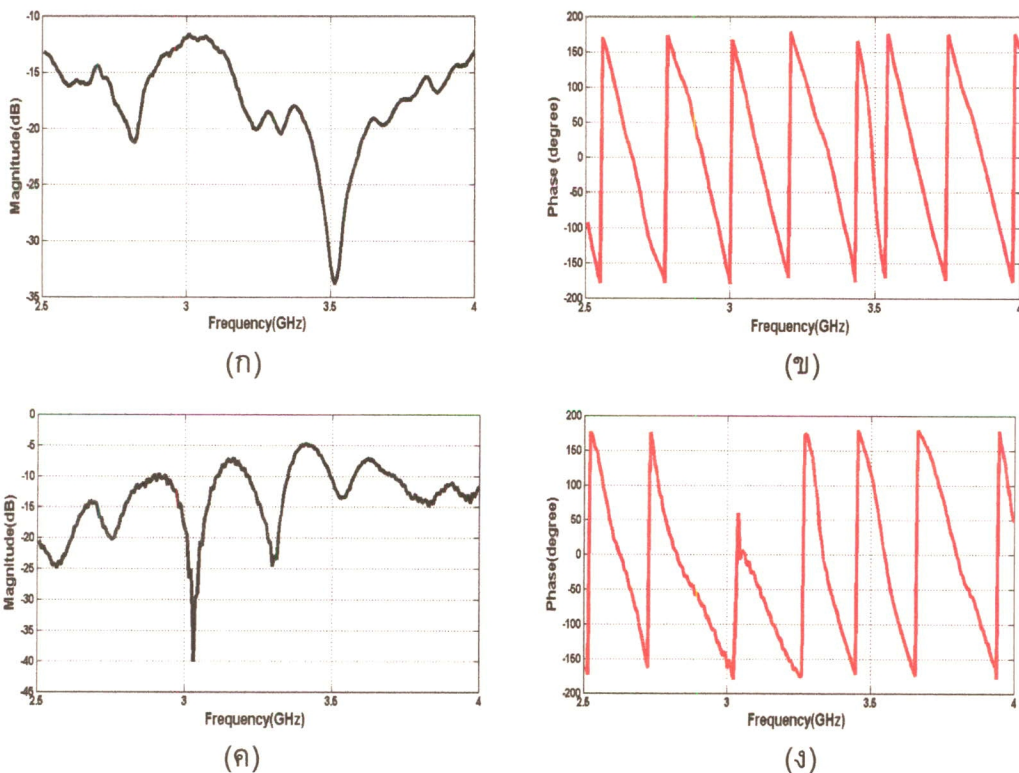
ดังนั้นในการสร้างโครงสร้างเพื่อวัดคุณสมบัติของโครงสร้าง C_n โครงการวิจัยเราจึงเลือกการวางโครงสร้างกรณีทิศทางแขนตรงกันข้ามมุมระหว่างสองโครงสร้างเท่ากับศูนย์ (Non-Twisted: $\varphi = 0$) เนื่องจากวางลักษณะนี้ให้ค่าการสูญเสียที่ต่ำ



รูปที่ 2.34 (ก) ค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (ข) ค่าการสูญเสียของการวางโครงสร้าง C_8 โดยมีทิศทางแขนตรงกันข้ามมุมระหว่างสองโครงสร้างเท่ากับศูนย์ (Non-Twisted: $\varphi = 0$)

การวัดคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง

หลังจากที่ได้ศึกษาการวางและการปรับพารามิเตอร์ของโครงสร้างส่งผลต่อค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าและค่าการสูญเสีย การศึกษาข้างต้นนำไปสู่การสร้างและการวัดของโครงสร้าง C_7 และโครงสร้าง C_8 ที่มีคุณสมบัติดังกล่าว คือ ค่าดัชนีหักเหและแถบการส่งผ่านที่สูง ขณะที่ค่าการสูญเสียมีค่าต่ำ ส่วนการวัดของโครงสร้างประกอบด้วยสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อนเชิงเส้น (Linear Polarization) แต่ละแกนประกอบด้วย (1) แกน x-x (2) แกน y-y (3) แกน x-y และ (4) แกน y-x หลังจากนั้นนำมาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อนของคลื่นวงกลม (Circular Polarization) ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแต่ละแกนแสดงดังรูปที่ 2.35-2.37 และสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อนของคลื่นวงกลมแสดงดังรูปที่ 2.39 ตามลำดับ จากนั้นนำมาคำนวณหาพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า อาทิเช่น ค่าไครเรลิตี ค่าดัชนีหักเหของแสง และค่าอื่นๆ

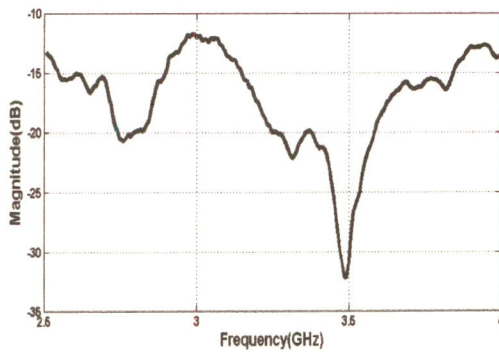


รูปที่ 2.35 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อนเชิงเส้นของแกน x-x ของโครงสร้าง C_8

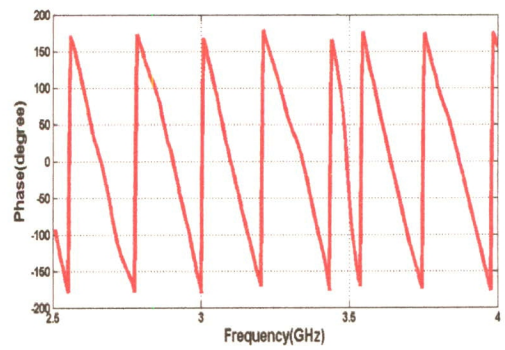
(ก) ขนาดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (ข) เฟสของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

(ค) ขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อน และ (ง) เฟสของสัมประสิทธิ์การสะท้อน

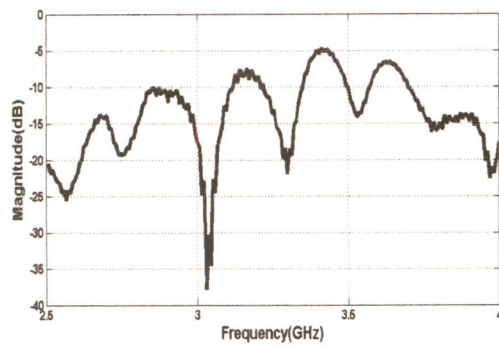
จากการวัดค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้น (Linear Polarization) ของแกน x-x และแกน y-y ค่าสัมประสิทธิ์ส่งผ่านมีลักษณะคล้ายกันเนื่องจากลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นจากสายอากาศฮอร์นกระทำกับโครงสร้างมีลักษณะคล้ายกัน คือ เกิดเรโซแนนซ์ในช่วงความถี่ 2.8 และ 3.5 GHz ในส่วนแกน x-y และแกน y-x ค่าสัมประสิทธิ์ส่งผ่านมีลักษณะที่ความแตกต่างกัน ขณะที่สัมประสิทธิ์การสะท้อนของทุกแกนมีลักษณะคล้ายกัน



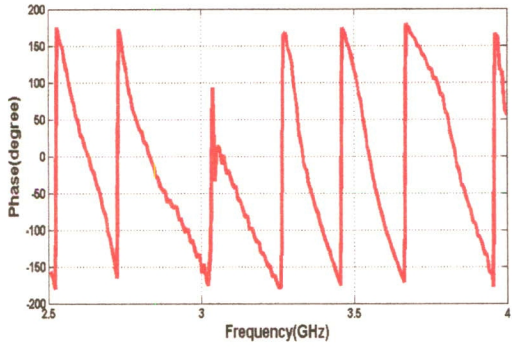
(ก)



(ข)



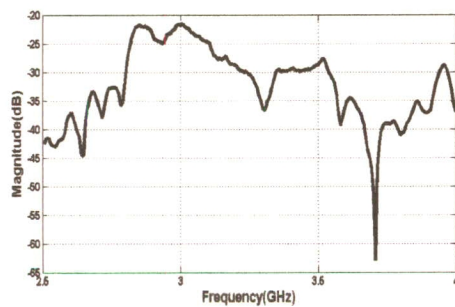
(ค)



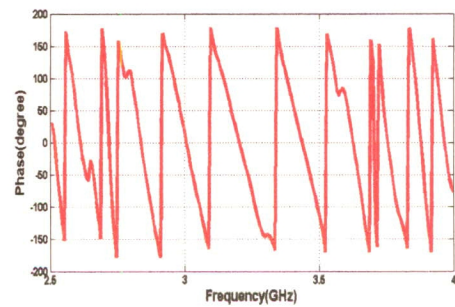
(ง)

รูปที่ 2.36 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อนเชิงเส้นของแกน y-y ของโครงสร้าง C_8

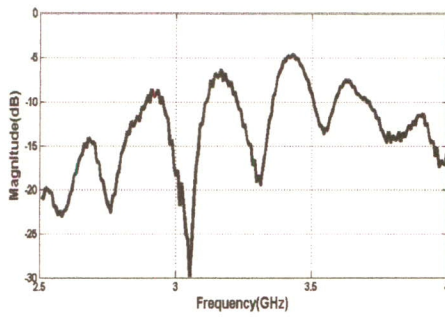
(ก) ขนาดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (ข) เฟสของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (ค) ขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อน และ (ง) เฟสของสัมประสิทธิ์การสะท้อน



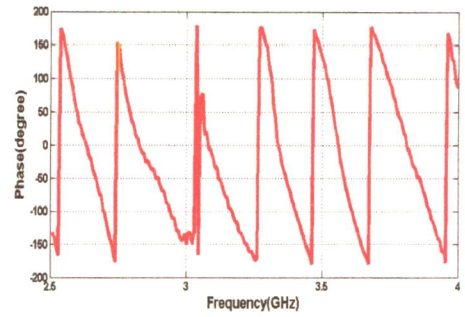
(ก)



(ข)



(ค)

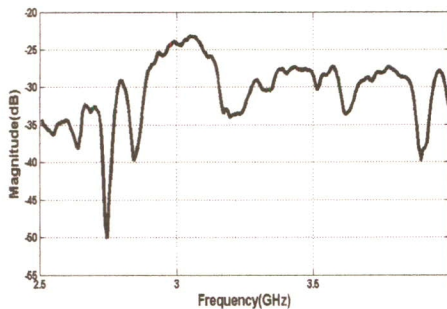


(ง)

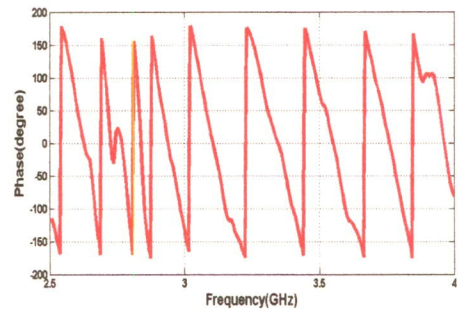
รูปที่ 2.37 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อนเชิงเส้นของแกน x-y ของโครงสร้าง C_8

(ก) ขนาดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (ข) เฟสของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

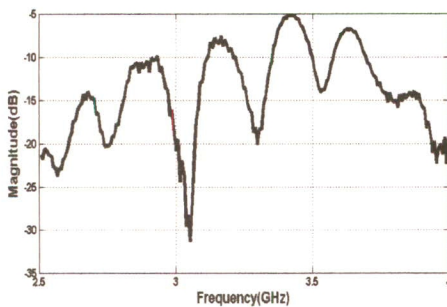
(ค) ขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อน และ (ง) เฟสของสัมประสิทธิ์การสะท้อน



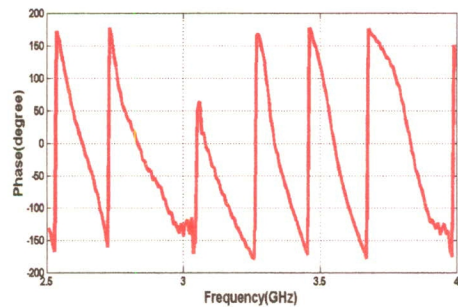
(ก)



(ข)



(ค)



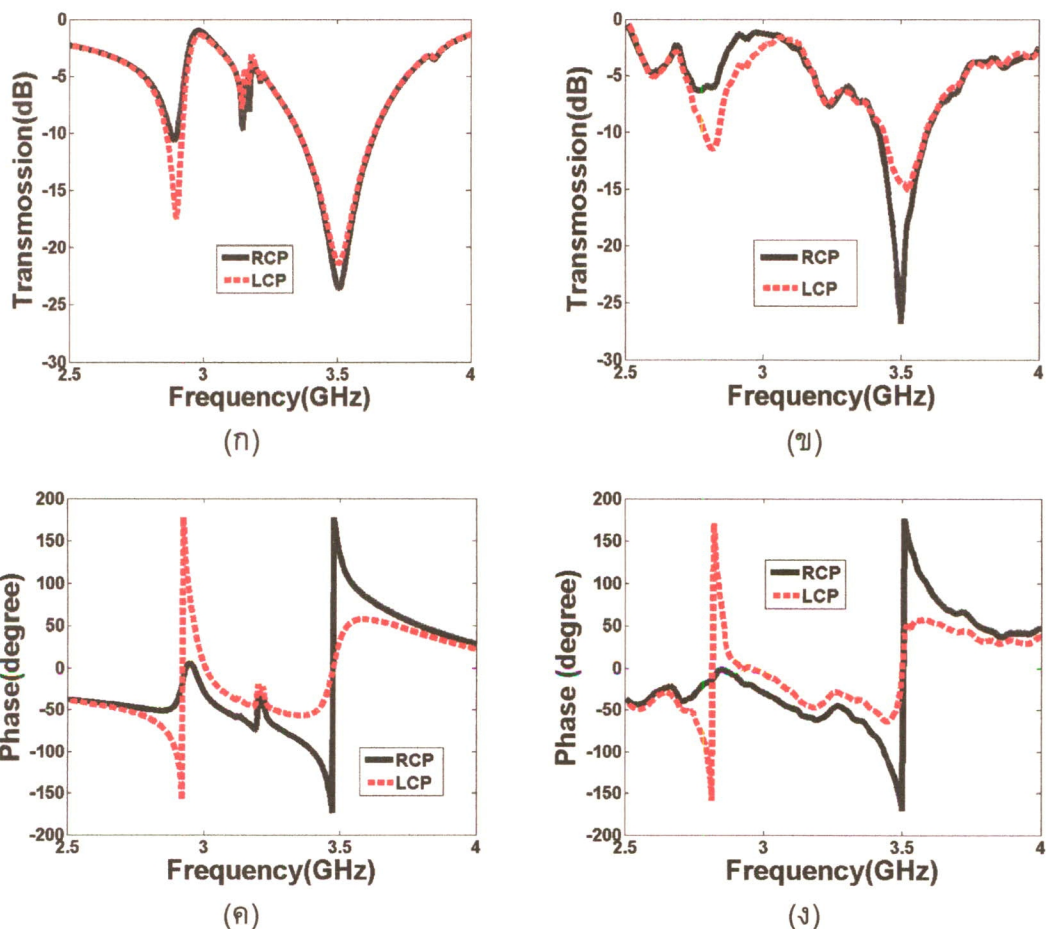
(ง)

รูปที่ 2.38 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อนเชิงเส้นของแกน y-x ของโครงสร้าง C_8

(ก) ขนาดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (ข) เฟสของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (ค) ขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อน และ (ง) เฟสของสัมประสิทธิ์การสะท้อน

หลังจากวัดการโพลาไรเซชันเชิงเส้นประกอบด้วยแกน x-x แกน y-y แกน x-y และ แกน y-x จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อนของคลื่นวงกลม (Circular Polarization) ซึ่งประกอบด้วยคลื่นหมุนซ้าย (Left Circular Polarization: LCP) และ คลื่นหมุนขวา (Right Circular Polarization: RCP) สององค์ประกอบของการโพลาไรเซชันแบบ หมุนนี้จะถูกนำมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อเปรียบเทียบระหว่าง

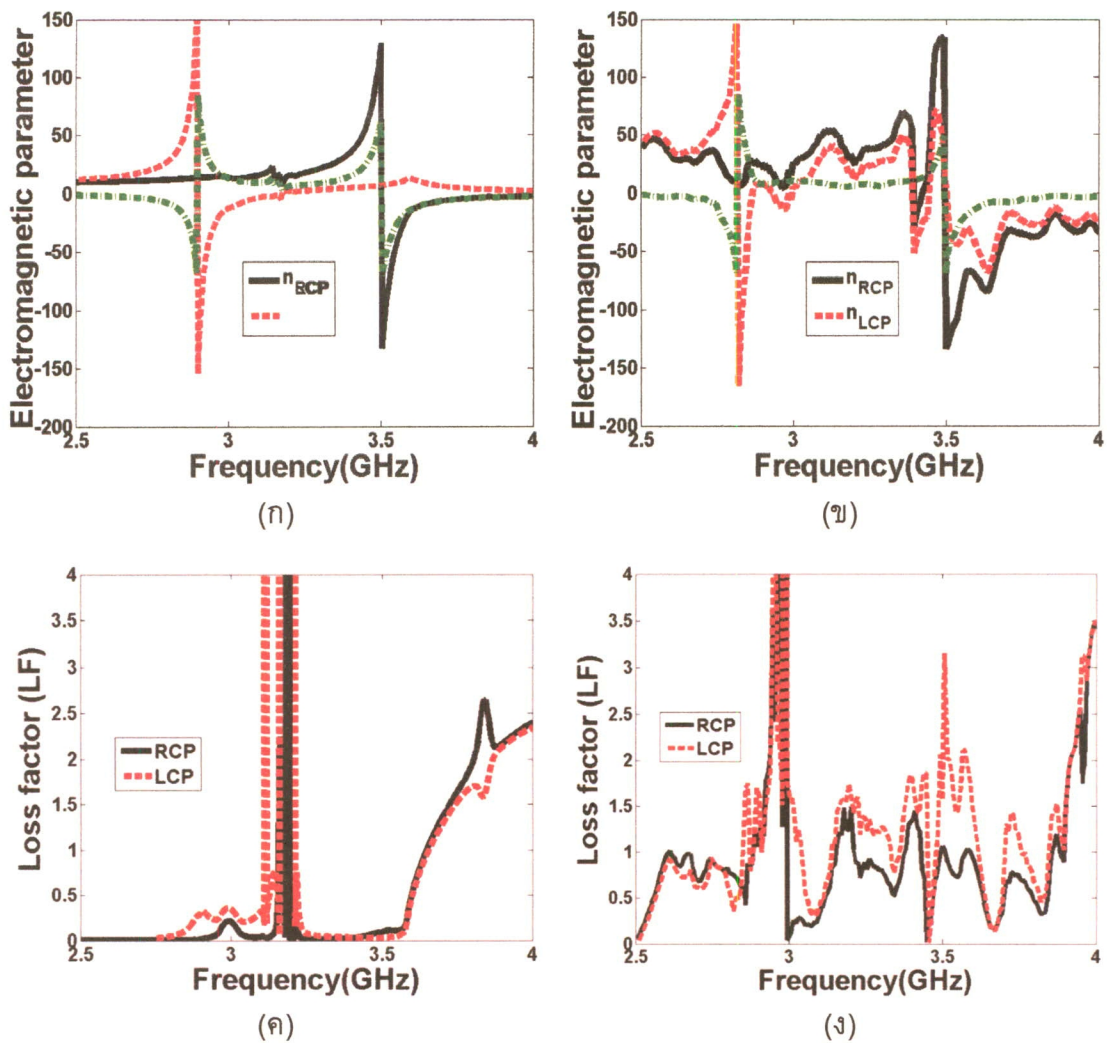
โปรแกรมประมวลผลทางคอมพิวเตอร์กับการวัดจริง ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นหมุนซ้ายและหมุนขวาของโครงสร้าง C_8 แสดงดังรูปที่ 2.37 ค่าขนาดและเฟสของโครงสร้างของการประมวลผลทางคอมพิวเตอร์และวัดจริงมีแนวโน้มคล้ายกัน คือ เกิดการเรโซแนนซ์ในช่วงความถี่ 2.8 GHz ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่น LCP มากกว่า RCP ประมาณ 6-7.5 dB สำหรับโปรแกรมประมวลผล ขณะการวัดจริงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่น LCP มากกว่า RCP ประมาณ 5 dB ช่วงความถี่ 3.5 GHz ความแตกต่างของการส่งผ่านของคลื่นประมาณ 3 dB และ 10 dB สำหรับโปรแกรมประมวลผลและการวัดจริงตามลำดับ



รูปที่ 2.39 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นหมุนซ้ายและหมุนขวาของโครงสร้าง C_8 (ก) ขนาด และ (ค) เฟสของโปรแกรมประมวลผลทางคอมพิวเตอร์ (ข) ขนาด และ (ง) เฟสของการวัดจริง

สำหรับค่าไครลลิตีและค่าดัชนีหักเหของโครงสร้าง C_8 แสดงดังรูปที่ 2.40 (ก-ข) พารามิเตอร์ทั้งสองของการวัดจริงมีแนวโน้มคล้ายกับการประมวลผลทางคอมพิวเตอร์ โดยช่วง

การเรโซแนนท์ค่าดัชนีไครเรลิตีของโปรแกรมประมวลผลทางคอมพิวเตอร์และการวัดจริง ประมาณ +80 ถึง -60 สำหรับเรโซแนนท์แรก +60 ถึง -60 สำหรับเรโซแนนท์ที่สองแบนด์วิดท์ ค่าดัชนีไครเรลิตีมีค่าประมาณ 3 ขณะที่ค่าดัชนีหักเหของคลื่น ± 150 สำหรับเรโซแนนท์แรก +150 ถึง -100 สำหรับเรโซแนนท์ที่สอง รวมถึงค่าการสูญเสียของโครงสร้าง C_8 แสดงดังรูปที่ 2.40 (ค-ง) ผลของการวัดจริงมีแนวโน้มคล้ายกับการประมวลผลทางคอมพิวเตอร์

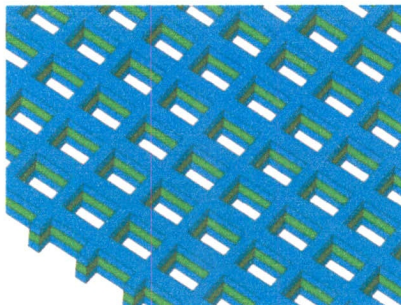


รูปที่ 2.40 ค่าไครเรลิตี ค่าดัชนีการหักเหของโครงสร้าง C_8 (ก-ข) สำหรับโปรแกรมประมวลผลทางและการวัดจริง และค่าการสูญเสีย (ค-ง)

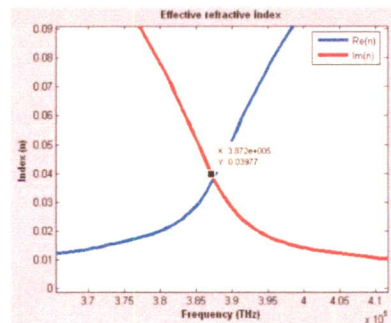
2.2 โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ที่ค่าดัชนีหักเหเข้าใกล้ศูนย์

วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ที่มีค่าดัชนีหักเหเข้าใกล้ศูนย์ ได้มีการพิสูจน์ทั้งในด้านคณิตศาสตร์ [11-13] เพื่อแสดงถึงคุณสมบัติของวัสดุ รวมทั้งมีการแสดงการประมวลผลทาง

คอมพิวเตอร์ (Simulations) [12, 14-15] ที่แสดงให้เห็นว่าวัสดุที่มีค่าดัชนีหักเหเข้าใกล้ศูนย์สามารถสร้างได้ และมีพฤติกรรมและเงื่อนไขตามทฤษฎี ทำให้มีกลุ่มวิจัยหลายกลุ่มได้ทำการออกแบบโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ที่มีค่าดัชนีหักเหเข้าใกล้ศูนย์หลากหลายโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น โครงสร้างร่างแห (Fishnet Structure) [16] ที่แสดงในรูปที่ 2.41 (ก) ได้ปรับปรุงโครงสร้างนี้จากเดิมที่มีกลุ่มวิจัยเคยศึกษาเกี่ยวกับวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ที่มีค่าดัชนีหักเหติดลบ โดยได้ปรับปรุงขนาดของโครงสร้างจนทำให้วัสดุที่ออกแบบนั้นมีค่าดัชนีหักเหเข้าใกล้ศูนย์ที่ความถี่ 387.2THz มีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 0.04 (จุดตัดระหว่างส่วนจริงและส่วนจินตภาพของค่าดัชนีการหักเห) และถือว่าเป็นจุดที่มีอัตราการสูญเสียที่ต่ำ (พิจารณาจากค่าจินตภาพของค่าดัชนีหักเห) ดังแสดงในรูปที่ 2.41 (ข) เมื่อคำนวณค่า Loss Factor (LF) ที่ความถี่ดังกล่าวจากสมการ $LF = \frac{n_{imag}}{n_{real}}$ จะได้ $LF = 1$ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาในช่วงความถี่อื่น จะพบว่าในช่วงความถี่ที่น้อยกว่านี้จะมีค่าดัชนีหักเหที่เข้าใกล้ศูนย์มากกว่า แต่จะมีค่าอัตราการสูญเสียที่สูงกว่า และที่ความถี่สูงกว่าจะมีค่าอัตราการสูญเสียที่ลดลงแต่ค่าดัชนีหักเหกลับมีค่าเพิ่มมากขึ้น



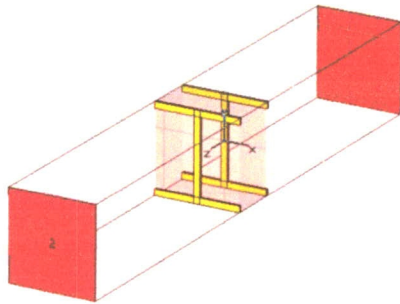
(ก)



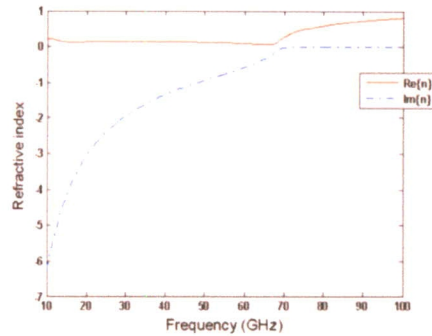
(ข)

รูปที่ 2.41 (ก) โครงสร้างร่างแห (ข) ค่าดัชนีหักเหของโครงสร้างร่างแห [16]

โครงสร้างต่อมาคือโครงสร้างรูปตัว "I" (I Pattern) [17] ออกแบบให้โดยใช้หลักการอาศัยการตอบสนองของวัสดุในช่วงความถี่พลาสมา (Plasma Frequency) ที่จะทำให้ค่า ϵ มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.42 (ก) ซึ่งเมื่อนำโครงสร้างนี้มาจัดเรียงกันให้เป็นรายคาบ จะทำให้ได้โครงสร้างที่คล้ายๆ กับโครงสร้างร่างแหที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ จะมีการนำทองแดงมาเรียงเป็น 2 ชั้น ซึ่งแต่ละชั้นกันด้วยโฟม ความกว้างของเส้นทองแดงคือ 5 mil มีความหนา 2 mil แต่ละคาบกว้าง 79 mil แต่ละชั้นห่างกัน 39 mil ผลการหาค่าดัชนีหักเหของวัสดุนี้แสดงดังรูปที่ 2.42 (ข) วัสดุมีค่าดัชนีหักเหเข้าใกล้ศูนย์ในช่วงความถี่ 10 – 70 GHz แต่ถ้าพิจารณาอัตราการสูญเสีย (ส่วนจินตภาพของค่าดัชนีหักเห) จะพบว่ามีความถี่สูงพอสมควร และเมื่อความถี่สูงขึ้นจะทำให้ค่าอัตราการสูญเสียลดลงแต่ค่าดัชนีหักเหเพิ่มขึ้น



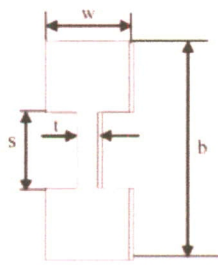
(ก)



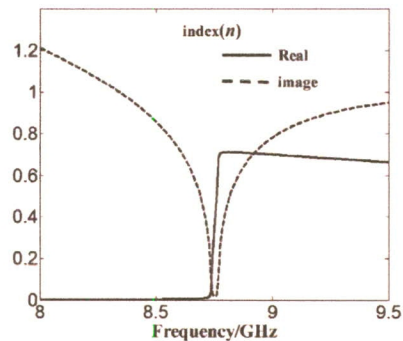
(ข)

รูปที่ 2.42 (ก) โครงสร้างรูปตัว I และ (ข) ค่าดัชนีหักเหของวัสดุ

โครงสร้างรูปตัว I [18] สองชั้นซึ่งจะมีคุณสมบัติที่สามารถควบคุมได้ทั้งคุณสมบัติทางไฟฟ้าและแม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 2.42 (ก) ขนาดของโครงสร้าง $a = 6 \text{ mm}$, $b = 10 \text{ mm}$, $m = 10 \text{ mm}$, $t = 1 \text{ mm}$ บนวัสดุ Rogers 5880 หนา 0.787 mm ซึ่งผลที่ได้จะพบว่าในช่วงความถี่ต่ำกว่า 8.75 GHz ค่าดัชนีหักเหของวัสดุโครงสร้างจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ แต่ถ้าพิจารณาที่อัตราการสูญเสียจะพบว่าจะมีค่าที่สูง ทำให้คลื่นผ่านไปได้น้อย จะมีช่วงที่อัตราการสูญเสียที่น้อยลงในช่วงความถี่ 8.75 GHz แต่ก็เป็นแค่ในช่วงความถี่ที่แคบๆ เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.43 (ข) ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่บทความนี้เลือกไปในการเพิ่มค่า Directivity ของสายอากาศ



(ก)

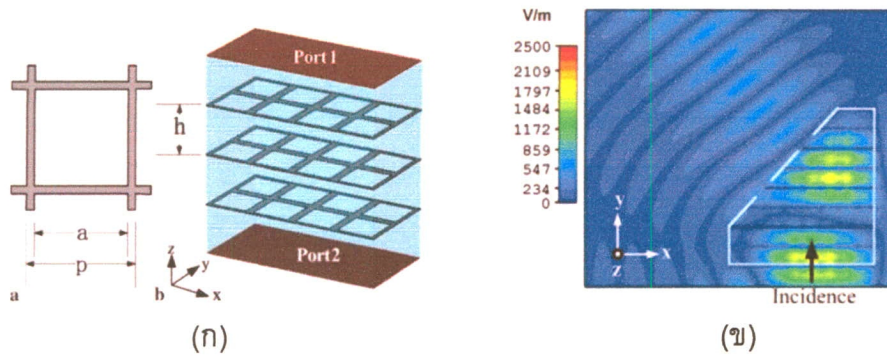


(ข)

รูปที่ 2.43 (ก) โครงสร้าง Thin-wire arrays และ (ข) ค่าดัชนีหักเหของวัสดุ

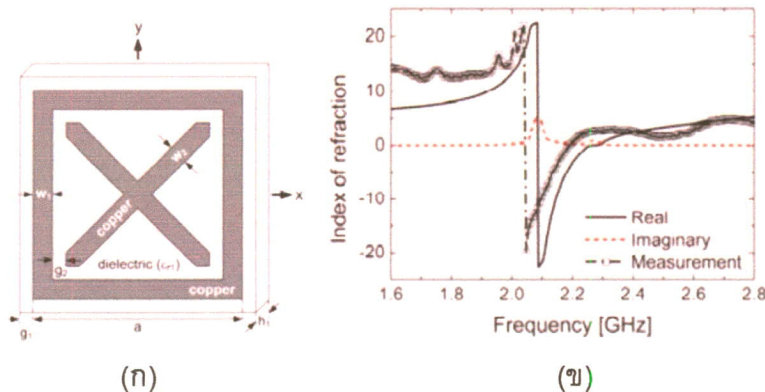
โครงสร้างรูปสี่เหลี่ยมแลตทิซ (Square Lattice) [19] 3 ชั้นแต่ละชั้นกันด้วยโฟม (Foam) ซึ่งเมื่อนำแต่ละคาบมารวมกันจะทำให้ได้โครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายๆ กับโครงสร้างร่างแห การออกแบบโครงสร้างนี้อาศัยหลักการการทำให้ค่า ϵ มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ในช่วงความถี่พลาสมา (Plasma Frequency) ซึ่งจะทำให้ค่าดัชนีหักเหเข้าใกล้ศูนย์ได้ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.44 (ก) แต่ผลการวัดค่าดัชนีหักเหของวัสดุนี้จะได้ไม่ได้แสดงให้เห็นเป็นกราฟแต่จะแสดงให้เห็นเป็นทิศทางการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า เมื่อออกแบบโครงสร้างให้เป็นโครงสร้าง Wedge ดัง

แสดงในรูปที่ 2.44 (ข) จะเห็นว่าคลื่นจะเคลื่อนที่ออกจากวัสดุในทิศทางที่ตั้งฉากกับผิวของวัสดุ ตรงตามคุณสมบัติของวัสดุที่มีค่าดัชนีหักเหเข้าใกล้ศูนย์ทั้งนี้กลุ่มวิจัยนี้ไม่ได้แสดงให้เห็นถึง อัตราการสูญเสียของวัสดุโครงสร้างนี้



รูปที่ 2.44 (ก) โครงสร้างรูปสี่เหลี่ยม และ (ข) ทิศทางการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของวัสดุ

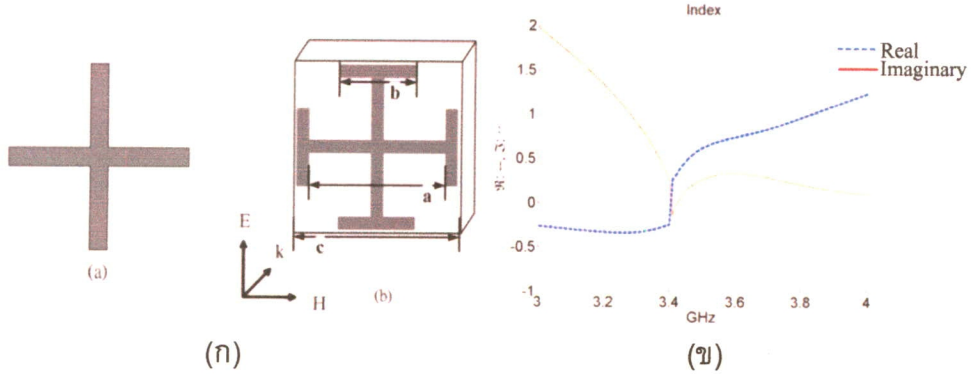
โครงสร้างรูปตัวเอ็กซ์ (X-Shape) [20] อยู่ภายในโครงสร้างรูปวงแหวนสี่เหลี่ยม (Square loop) ดังแสดงในรูปที่ 2.45 (ก) วัสดุที่ใช้เป็น Taconic RF-60A laminate หนา 3.175 mm มีค่า $\epsilon_r = 6.15$ $\tan \delta_c = 0.0018$ ขนาดของโครงสร้างคือ $a = 18$ mm, $g_1 = 2$ mm, $g_2 = w_1 = 0.5$ mm, $w_2 = 1.5$ mm ค่าดัชนีหักเหของวัสดุที่วัดได้จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ในช่วงความถี่ 2.25-2.29 GHz ซึ่งถือว่าเป็นช่วงความถี่ที่แคบมากแต่ถ้าพิจารณาที่อัตราการสูญเสียของวัสดุถือว่ามีความน้อยทุกช่วงความถี่



รูปที่ 2.45 (ก) โครงสร้างรูปตัวเอ็กซ์ และ (ข) ค่าดัชนีหักเหของวัสดุ

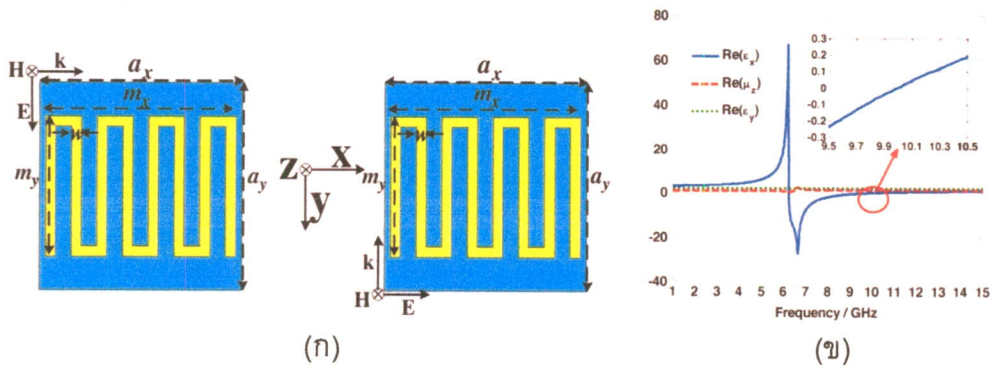
โครงสร้าง Jerusalem Cross Structure [21] ซึ่งออกแบบโดยอ้างอิงจากโครงสร้างแบบ Cross ที่สามารถให้ค่า ϵ ที่เข้าใกล้ศูนย์ได้ (ENZ) แต่ได้ทำการเพิ่มแขนเข้าไปเพื่อให้ขนาดของโครงสร้างเล็กลง ทำให้ได้โครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.46 (ก) ขนาดของโครงสร้าง $a = 20$

mm, $b = 19$ mm และ $c = 23$ mm สร้างบนวัสดุ FR 4 หนา 0.8 mm มีค่า $\epsilon_r = 4.4$ สำหรับค่าดัชนีหักเหของวัสดุมีค่าดังแสดงในรูปที่ 2.46 (ข)



รูปที่ 2.46 (ก) โครงสร้าง Jerusalem Cross Structure และ (ข) ค่าดัชนีหักเหของวัสดุ

นอกจากนี้ยังมีโครงสร้างที่อาศัยหลักการของ Meander Line [22] ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ทางไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้สามารถออกแบบควบคุมให้ค่า ϵ มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ในช่วงความถี่ที่ต้องการได้และวัสดุที่ได้จะเป็นวัสดุแบบแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) ที่มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.47 (ก) ขนาดของโครงสร้าง $a_x = a_y = 4$ mm, $w = 0.2$ mm, $m_x = 3.77$ mm, $m_y = 2.7$ mm บนวัสดุ F4B หนา 0.5 mm มีค่า $\epsilon_r = 2.65$ และ $\tan \delta_c = 0.001$ ผลที่ได้ดังรูปที่ 2.47 (ข) เป็นการแสดงค่า ϵ และ μ ของวัสดุที่วัดในแกนที่ต่างกัน ซึ่งจะพบว่าวัสดุสามารถให้ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเข้าใกล้ศูนย์ได้ในแต่ละแกน แต่ก็ยังไม่ได้กล่าวถึงอัตราการสูญเสียของวัสดุนี้



รูปที่ 8 (ก) โครงสร้าง Meander Line และ (ข) ค่า ϵ และ μ ของแกนต่างๆ

การประยุกต์ใช้งานวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ที่มีค่าดัชนีหักเหเข้าใกล้ศูนย์นั้น ก็จะมีการนำไปใช้ในการควบคุมทิศทาง (Directivity) หรือเพิ่มอัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศชนิดต่างๆ [18-20, 20, 23] นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้สำหรับเพิ่มความเร็วในการส่งข้อมูลในระบบสื่อสาร [24] หรือการนำไปใช้ในการแก้ปัญหาการ Mismatch ของท่อนำคลื่น (Waveguides) ที่มีลักษณะเป็นช่องแคบ หรือมีการโค้งงอเกิดขึ้น [22]

วัสดุจะมีค่าดัชนีหักเหเป็นศูนย์หรือเข้าใกล้ศูนย์ สามารถสร้างได้โดยการออกแบบให้ค่าวัสดุมีค่า Permittivity (ϵ) และค่า Permeability (μ) ให้มีค่าที่เหมาะสม จะทำให้ได้ค่าดัชนีหักเห (n) ตามความสัมพันธ์ของค่าทั้งสามแสดงที่ได้ในสมการ

$$n = \sqrt{\epsilon\mu} \quad (2.2)$$

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2.3)$$

จากสมการที่ (2.2) จะพบว่าวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ที่มีค่าดัชนีหักเหเข้าใกล้ศูนย์สามารถเกิดขึ้นได้จาก 3 เงื่อนไข ดังนี้

1. เมื่อค่า $\epsilon \rightarrow 0$
2. เมื่อค่า $\mu \rightarrow 0$
3. เมื่อค่า $\epsilon \rightarrow 0$ และ $\mu \rightarrow 0$

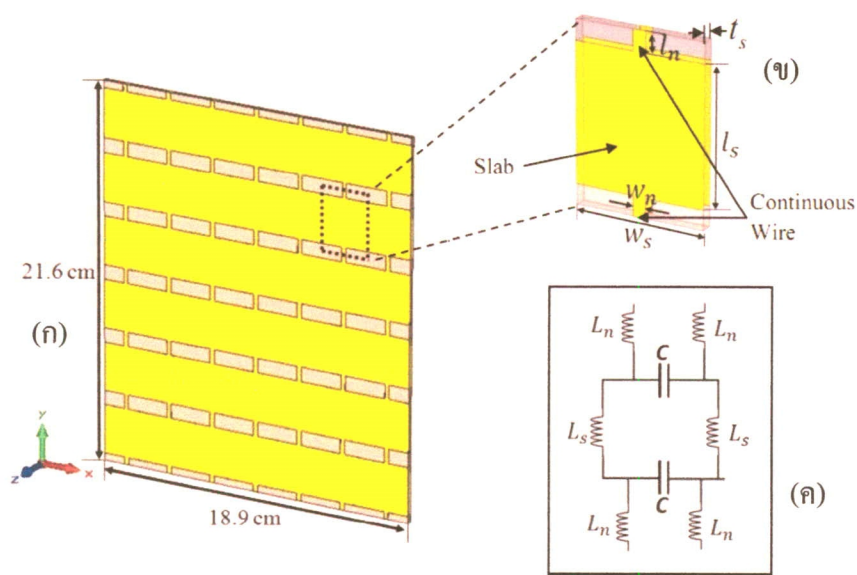
เงื่อนไขสองข้อแรกนั้น สามารถทำให้วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ที่มีค่าดัชนีหักเหเข้าใกล้ศูนย์ได้อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาที่ค่าอิมพีแดนซ์ ตามสมการที่ (2.3) จะพบว่าจะมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ไม่สอดคล้องหรือไม่ Match กับ Free space จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่สูง (ความสามารถในการส่งผ่านที่ต่ำ) ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการในการประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์โดยทั่วไป ดังนั้นการออกแบบให้วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ให้มีค่าดัชนีหักเหเข้าใกล้ศูนย์ จะต้องออกแบบให้มีคุณสมบัติอยู่ในเงื่อนไขที่ 3 ซึ่งจะทำให้วัสดุนี้จะ Match กับ Free space ทำให้มีการสูญเสียในการส่งผ่านที่ต่ำ เนื่องจากมีส่วนจินตภาพของดัชนีหักเหที่ต่ำ

โดยทั่วไปแล้วจะมีการสร้างวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ที่เป็นแบบระนาบ (Planar Metamaterials) ที่เป็นแบบทั้งค่า ϵ และ μ มีค่าน้อยกว่าศูนย์หรือติดลบทั้งคู่ เรียกว่า Double Negative (DNG) Metamaterials และอีกแบบก็คือทั้งค่า ϵ และ μ มีค่ามากกว่าศูนย์หรือเป็นบวกทั้งคู่ ที่เรียกว่า Double Positive (DPS) Metamaterials ซึ่งการออกแบบวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ที่มีค่าดัชนีหักเหเข้าใกล้ศูนย์นั้นจะอาศัยหลักการเข้ากันได้ (Matching) ของความถี่เรโซแนนซ์ทางไฟฟ้าและทางแม่เหล็ก (Electrical and Magnetic Resonance) ในช่วงที่มีการเปลี่ยนค่าจาก DNG ไปสู่ DPS

โครงสร้างร่างแห (Fishnet Structure) ดังแสดงในรูปที่ 2.48 เป็นโครงสร้างที่เกิดจากการรวมกันของโครงสร้างแผ่นหนาแบบสั้นๆ (Pair of Short Slabs) กับโครงสร้างเส้นแบบต่อเนื่อง (Continuous Wires) ซึ่งจากการศึกษามาก่อนหน้านี้พบว่า โครงสร้างแผ่นหนาแบบสั้นจะมีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่คล้ายกันกับโครงสร้าง SRR [25] ข้อดีของโครงสร้างแผ่นหนาเมื่อเทียบกับโครงสร้าง SRR คือ เป็นโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและสามารถ

สร้างคุณสมบัติแบบซ้ายมือ (Left- Handed Behavior) สำหรับการเคลื่อนที่ของคลื่นที่ตั้งฉาก (Normal Incidence) กับโครงสร้างได้ โครงสร้างเส้นตรงแบบต่อเนื่องจะมีพฤติกรรมเหมือน Electric resonance ที่สามารถให้ค่า ϵ ที่เป็นลบได้ [26] ขณะที่โครงสร้างแผ่นหนาจะมีพฤติกรรมเหมือน Magnetic Resonance ซึ่งจะสามารถให้ค่า μ ที่เป็นลบได้ จากลักษณะและคุณสมบัติของโครงสร้างร่างแหนั้นจะทำให้สามารถออกแบบให้ได้ค่า ϵ และ μ ตามที่เราต้องการได้โดยการปรับขนาดของโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น ϵ สามารถปรับได้โดยการปรับค่าความกว้างของส่วนคอด (w_n) และค่า μ จะถูกควบคุมด้วยความกว้างของแผ่นหนา (w_s)

หลักการออกแบบโครงสร้างร่างแหให้มีค่าดัชนีหักเหของวัสดุเข้าใกล้ศูนย์นั้นสามารถทำได้โดยการปรับให้เกิดความเข้ากันได้ (Matching) ระหว่างค่าความถี่เรโซแนนซ์ทางไฟฟ้า (Electric Resonance) และความถี่เรโซแนนซ์ทางแม่เหล็ก (Magnetic Resonance) ในช่วงที่โครงสร้างให้คุณสมบัติที่จะเปลี่ยนจากบริเวณที่ค่า ϵ และ μ เป็นลบทั้งคู่ (Double Negative Region) ไปสู่บริเวณที่ค่า ϵ และ μ เป็นบวกทั้งคู่ (Double Positive Region) ค่าความถี่เรโซแนนซ์ทางไฟฟ้าและความถี่เรโซแนนซ์ทางแม่เหล็ก สามารถปรับโดยผ่านโครงสร้างโครงสร้างเส้นตรงและโครงสร้างแบบแผ่นหนา โดยทั่วไปแล้วค่าความถี่เรโซแนนซ์ทางไฟฟ้านั้นสามารถเกิดที่ความถี่ต่ำและสามารถปรับได้ง่ายกว่า ดังนั้นในการออกแบบโครงสร้างร่างแหสำหรับโครงการนี้จะอาศัยหลักการปรับการปรับตำแหน่งของความถี่เรโซแนนซ์ทางแม่เหล็ก



รูปที่ 2.48 โครงสร้างร่างแหและวงจรไฟฟ้าสมมูลของโครงสร้าง

วงจรไฟฟ้าสมมูลของโครงสร้างร่างแห

การหาวงจรไฟฟ้าสมมูลของโครงสร้างร่างแหนั้นจะถูกมองเป็นวงจรของตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุ (C) โดยมีลักษณะคล้ายกับวงจรไฟฟ้าสมมูลของโครงสร้างแผ่นหนาแบบสั้น [27] แต่จะมีส่วนที่เพิ่มเติมขึ้นมาคือตัวเหนี่ยวนำตรงส่วนของคอกของโครงสร้างที่แสดงผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.48 (ค) ที่แสดงภาพวงจรไฟฟ้าสมมูลของโครงสร้างร่างแห L_s เป็นตัวเหนี่ยวนำที่เกิดจากกระแสที่ไหลในแผ่นหนา L_n เป็นตัวเหนี่ยวนำที่เกิดจากกระแสที่ไหลในส่วนคอกของโครงสร้าง และ C เป็นตัวเก็บประจุระหว่างแผ่นหนาทั้งสอง

การหาความถี่สั่นพ้องของแม่เหล็กของโครงสร้างร่างแหนั้นสามารถหาได้โดยพิจารณาจากภาพของวงจรไฟฟ้าสมมูลที่แสดงในรูปที่ 2.48 (ค) จะทำให้ได้ค่าดังสมการที่ 2.4

$$\omega_m^2 = \frac{1}{LC} = \frac{1}{L_s C} + \frac{1}{L_n C} \quad (2.4)$$

การหาค่าความเหนี่ยวนำและความจุไฟฟ้าของโครงสร้างร่างแห

การหาค่าความเหนี่ยวนำและความจุไฟฟ้าของโครงสร้างร่างแห จะเป็นการประมาณค่าคร่าวๆ จากรูปที่ 2.48 (ค) ที่แสดงภาพโครงสร้างร่างแห การประมาณค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้างจะได้ดังสมการที่ (2.5) เมื่อ S แทนพื้นที่ของแผ่นขนาน และ t แทนความหนาของโครงสร้าง

$$C \sim \frac{S}{t} \quad (2.5)$$

ในขณะที่การหาค่าความเหนี่ยวนำของโครงสร้างนั้น สามารถประมาณค่าจากรูปแบบของสมการการหาค่าความเหนี่ยวนำของโซลินอยด์ (Solenoid) จะทำให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำของแผ่นหนาและค่าความเหนี่ยวนำที่คอกของโครงสร้างดังแสดงในสมการที่ (2.6) ตามลำดับ เมื่อ w_s และ w_n แทนความกว้างของแผ่นหนาและส่วนคอกของโครงสร้าง และ l_s และ l_n แทนความยาวของแผ่นหนาและความยาวของส่วนคอกตามลำดับ

$$L_s \sim \frac{l_s t}{w_s} \quad (2.6ก)$$

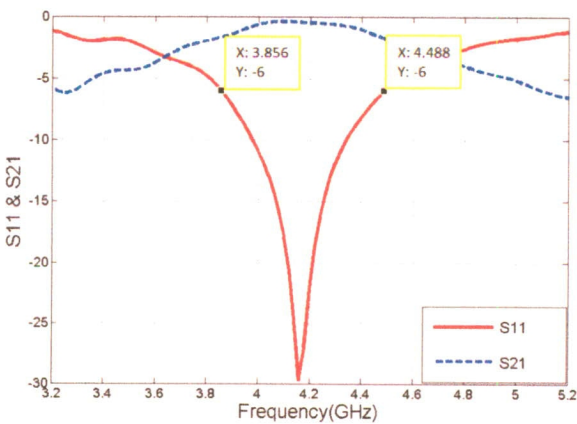
$$L_n \sim \frac{l_n t}{w_n} \quad (2.6ข)$$

เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำที่แผ่นหนาและส่วนคอดอขนานกันทำให้สามารถหาค่าความเหนี่ยวนำรวมของโครงสร้างร่างแหได้ดังสมการที่ 2.7 และจากสมการที่ 2.4 จะได้ค่าความถี่สั้นพ้องของแม่เหล็กของโครงสร้างได้ดังสมการที่ 2.8

$$\frac{1}{L} \sim \frac{l_s t}{w_s} + \frac{l_n t}{w_n} \tag{2.7}$$

$$f_m = \frac{\omega_m}{2\pi} \sim \sqrt{\frac{1}{l_s^2} + \frac{1}{l_s l_n} \frac{w_n}{w_s}} \tag{2.8}$$

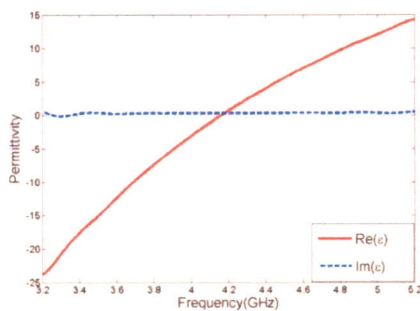
โครงสร้างร่างแหจะถูกออกแบบในโปรแกรม CST Microwave Studio โดยจำลองให้เป็นลักษณะโครงสร้างรายคาบ (Periodic Structure) โดยใช้ฐานรองเป็น FR4 ความหนา 2.4 mm ซึ่งมีค่า Dielectric Constant (ϵ_r) เท่ากับ 4.3 โครงสร้างที่ออกแบบมีขนาดดังนี้ : $w_s = 26\text{ mm}, w_n = 2.5\text{ mm}, l_s = 27\text{ mm}, l_n = 4\text{ mm}$ ขนาดของหนึ่ง Unit cell เท่ากับ $26 \times 35\text{ mm}$ และทองแดงมีความหนา 0.03 mm ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อนกลับจากการจำลองในโปรแกรมได้ผลดังแสดงในรูปที่ 2.49



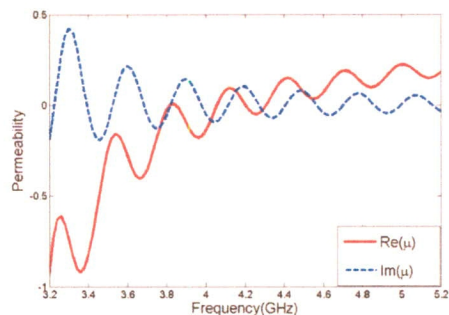
รูปที่ 2.49 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและสัมประสิทธิ์การสะท้อนของโครงสร้างร่างแหที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม

จากรูปที่ 2.49 จะพบว่าคลื่นสามารถโครงสร้างที่ออกแบบสามารถได้ในช่วงความถี่ 3.856 GHz – 4.488 GHz (วัดที่ -6 dB) และมีความถี่ที่ส่งผ่านได้ดีที่สุดอยู่ที่ 4.160 GHz หลังจากที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อนที่ได้จากการจำลองมาแล้ว ก็จะเข้าสู่กระบวนการมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ต้องการทราบ โดยในงานวิจัยนี้จะสนใจในค่าหลักๆ ดังนี้ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (ϵ) ค่าสภาพความซึมซาบได้ทางแม่เหล็ก (μ) ค่าดัชนีหักเห (n) และค่าการสูญเสีย (LF) โดยการหาค่านั้นจะยึดวิธีการหาตามบทความ [28-

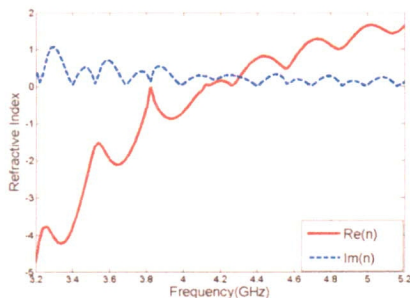
29] ซึ่งจะต้องมีการใช้ทั้งค่าขนาดและเฟสของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อนที่ได้จากการจำลอง ไปเข้าสู่อัลกอริทึมที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่สนใจในโปรแกรม MathLab ค่าที่ได้จะถูกแสดงออกมาในรูปแบบของกราฟดังที่แสดงในรูปที่ 2.50 ในรูปที่ 2.50 (ก) แสดงค่า ϵ ของโครงสร้างจะพบว่ามีค่าเข้าใกล้ศูนย์ในช่วงความถี่ที่มีการส่งผ่านได้ดีที่สุด ในขณะที่ค่า μ นั้นจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ในช่วงความถี่ที่ส่งผ่านทั้งหมด เนื่องจากโครงสร้างร่างแหประพุดิตัวเหมือนตัวสันฟองทางแม่เหล็ก ซึ่งในช่วงความถี่ที่สันฟองนั้นจะมีค่า μ ที่น้อยดังแสดงในรูปที่ 2.50 (ข) ในส่วนของค่าดัชนีหักเหของโครงสร้างในรูปที่ 2.51 (ค) แสดงให้เห็นในค่าที่ได้นั้นมีค่าเป็นทั้งบวกและลบ โดยในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่สันฟองจะได้ค่าดัชนีหักเหที่เป็นลบ ในขณะที่ความถี่ที่สูงกว่าจะได้ค่าดัชนีหักเหที่เป็นบวก และค่าดัชนีหักเหจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ (น้อยกว่า 1) ในช่วงความถี่ที่ส่งผ่านพอดี ซึ่งก็จะมีทั้งช่วงที่ค่าเป็นบวกและมีค่าเป็นลบเหมือนกัน แต่เมื่อพิจารณาที่ค่าการสูญเสียดังแสดงในรูปที่ 2.50 (ง) ในบางช่วงความถี่ที่ส่งผ่านที่มีค่าดัชนีหักเหเข้าใกล้ศูนย์นั้นจะมีค่าความสูญเสียที่มากกว่าหนึ่งซึ่งถือว่าเป็นค่าที่สูง (4.05 GHz – 4.25 GHz) ส่วนความถี่อื่นในช่วงที่ส่งผ่านได้นั้นจะมีค่าดัชนีหักเหเข้าใกล้ศูนย์และมีค่าการสูญเสียที่ต่ำด้วย



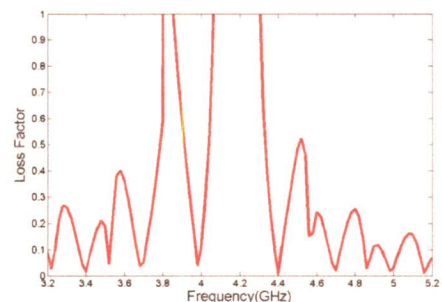
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

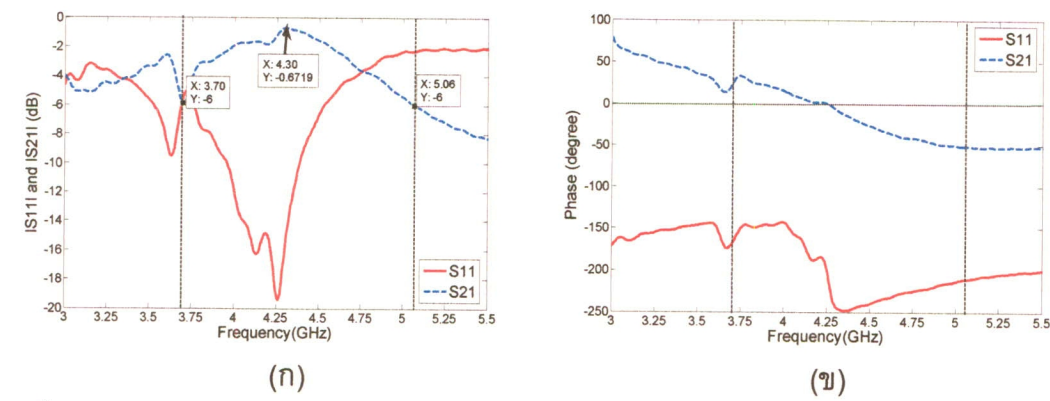
รูปที่ 2.50 (ก) ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (ข) ค่าสภาพความซึมซาบได้ทางแม่เหล็ก

(ค) ค่าดัชนีหักเห และ (ง) ค่าการสูญเสีย

โครงสร้างร่างแหแบบรายคาบ

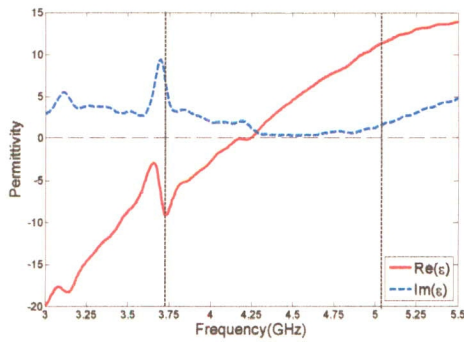
จากในกรณีแรก โครงสร้างที่ออกแบบนั้นถูกออกแบบให้เป็นโครงสร้างแบบ Unit Cell แต่ตั้งค่า Boundary Condition ให้เสมือนเป็นโครงสร้างแบบรายคาบแบบไม่มีขอบจำกัด ในการสร้างจริงจะไม่สามารถสร้างได้ ในกรณีนี้จึงได้ทำการศึกษาโครงสร้างที่ออกแบบเป็นแบบรายคาบตามจำนวนที่จะสร้างจริงโดยใช้โครงสร้าง 6 x 7 unit cell ดังรูป 2.48 (ก)

การจำลองในคอมพิวเตอร์นั้นจะมีขั้นตอนเหมือนกับในการทำแบบ Unit Cell แต่จะแตกต่างกันในส่วนของการตั้งค่า Boundary Condition ของโปรแกรม CST ซึ่งจะถูกตั้งค่าให้เป็น Open (Add Space) ทุกแกน ผลที่ได้จากการ Simulation พบว่าค่าความถี่นั้นเพิ่มขึ้น โดยมีการส่งผ่านที่ความถี่ 3.70 GHz ถึง 5.06 GHz (วัดที่ $S_{21} > -6$ dB) และความถี่ที่ส่งผ่านได้ดีที่สุดอยู่ 4.30 GHz ดังแสดงในรูปที่ 2.51 (ก)

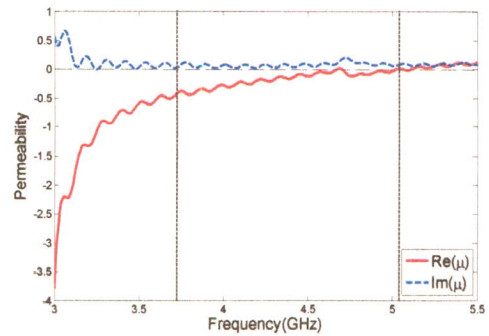


รูปที่ 2.51 (ก) ขนาด และ (ข) เฟสของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและสัมประสิทธิ์การสะท้อนของโครงสร้างร่างแหแบบรายคาบที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม

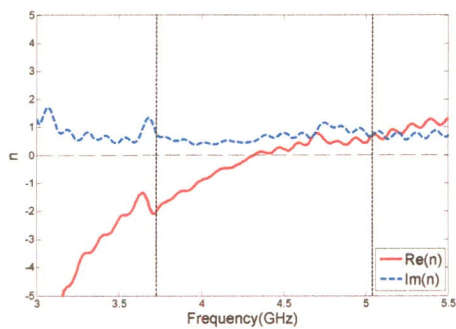
จากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและสัมประสิทธิ์การสะท้อนของโครงสร้างที่ได้จากการ Simulation สามารถนำไปหาค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้แก่ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า ค่าสภาพความซึมซาบได้ทางแม่เหล็ก และค่าดัชนีหักเห ที่ได้แสดงในรูปที่ 2.52 ซึ่งจากผลที่ได้พบว่าค่าสภาพยอมทางไฟฟ้ามีค่าเข้าใกล้ศูนย์ในช่วงความถี่ 4.10 GHz – 4.28 GHz ซึ่งสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 2.52 (ง) ค่าสภาพความซึมซาบได้ทางแม่เหล็กของโครงสร้างมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ในย่านความถี่ที่ส่งผ่าน ส่วนค่าดัชนีหักเหนั้นมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ในช่วงความถี่ 4.00 GHz – 4.5 GHz โดยจะสังเกตได้ว่าในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่ที่ส่งผ่านได้ดีที่สุดนั้นค่าดัชนีหักเหจะมีค่าเป็นลบ ส่วนที่ความถี่ที่สูงกว่าค่าดัชนีหักเหมีค่าเป็นบวก



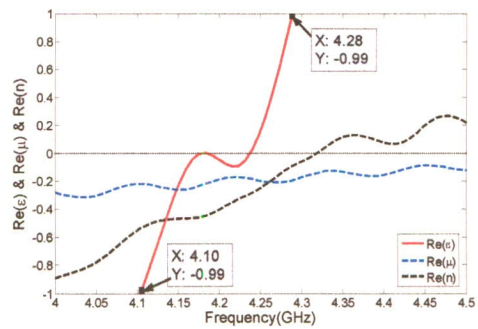
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

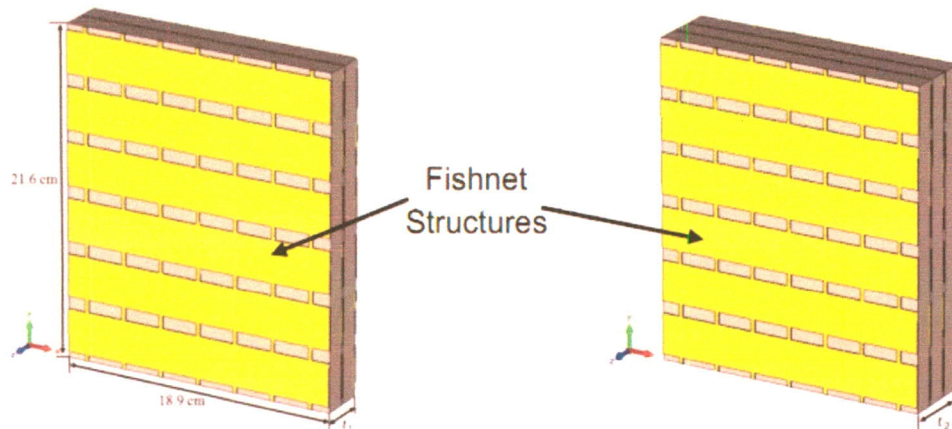
รูปที่ 2.52 (ก) ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (ข) ค่าสภาพความซึมซาบได้ทางแม่เหล็ก

(ค) ค่าดัชนีหักเห และ (ง) ภาพขยายของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า

ค่าสภาพความซึมซาบได้ทางแม่เหล็ก และค่าดัชนีหักเหของโครงสร้างร่างแหแบบรายคาบ

โครงสร้างร่างแหแบบรายคาบที่มีหลายชั้น

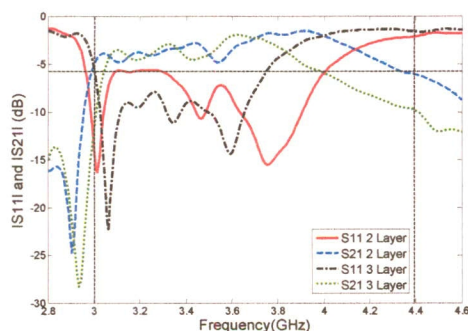
เนื่องจากสมการการหาค่าดัชนีหักเหของโครงสร้างขึ้นอยู่กับความหนาของโครงสร้าง ในส่วนนี้จึงเป็นการศึกษาโดยการออกแบบโครงสร้างเป็นสองและสามชั้นดังแสดงในรูปที่ 2.53 เพื่อศึกษาว่า ถ้าหากโครงสร้างมีความหนามากขึ้นจะมีผลต่อค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้างร่างแหที่ได้ออกแบบอย่างไร



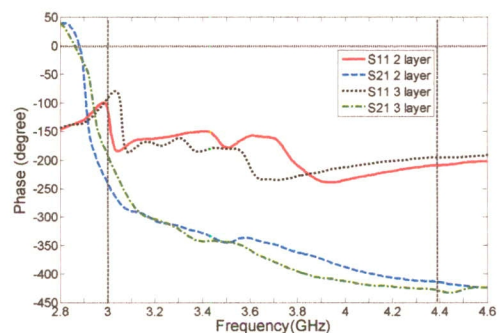
รูปที่ 2.53 โครงสร้างร่างแหแบบรายคาบสองและสามชั้น

รูปที่ 2.54 แสดงผลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและสัมประสิทธิ์การสะท้อนของโครงสร้างร่างแห แบบสองและสามชั้นจากการจำลองในคอมพิวเตอร์โดยรูป 2.54 (ก) แสดงขนาด และรูป 2.54 (ข) แสดงเฟสของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและสัมประสิทธิ์การสะท้อนตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้พบว่าค่าความถี่สั่นพ้องลดลงเมื่อเทียบกับโครงสร้างร่างแหแบบชั้นเดียว เนื่องจากถ้าเพิ่มจำนวนชั้นของโครงสร้างก็จะทำให้ค่า C ของโครงสร้างก็จะมากขึ้น และเนื่องจากค่า C แปรผกผันกับความถี่สั่นพ้อง ทำให้ความถี่สั่นพ้องของโครงสร้างมีค่าลดลง

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน และสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้ไปหาค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้างพบว่าค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า ค่าความซึมซาบได้ทางแม่เหล็ก และค่าดัชนีหักเหของโครงสร้างมีค่าลดลงจากโครงสร้างแบบชั้นเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.55 เนื่องจากในสมการการหาค่าดัชนีหักเห นั้น จะแปรผกผันกับค่าความหนาของโครงสร้างที่ได้ออกแบบ กล่าวคือถ้าความหนาของโครงสร้างลดลงจะทำให้ค่าดัชนีหักเหมากขึ้น ในทางกลับกัน ถ้าค่าความหนาของโครงสร้างเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ค่าดัชนีหักเหของโครงสร้างลดลง

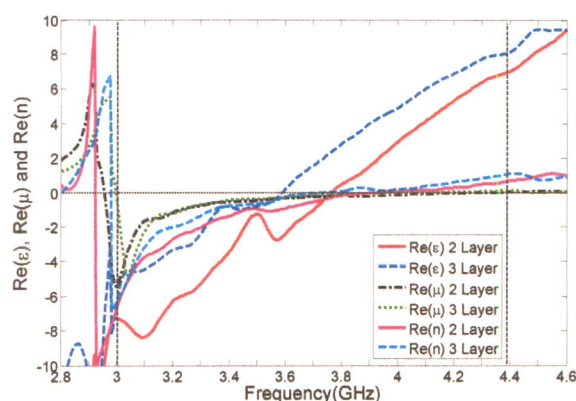


(ก)



(ข)

รูปที่ 2.54 (ก) ขนาด และ (ข) เฟสของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและสัมประสิทธิ์การสะท้อนของโครงสร้างร่างแหแบบรายคาบสองและสามชั้นที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม

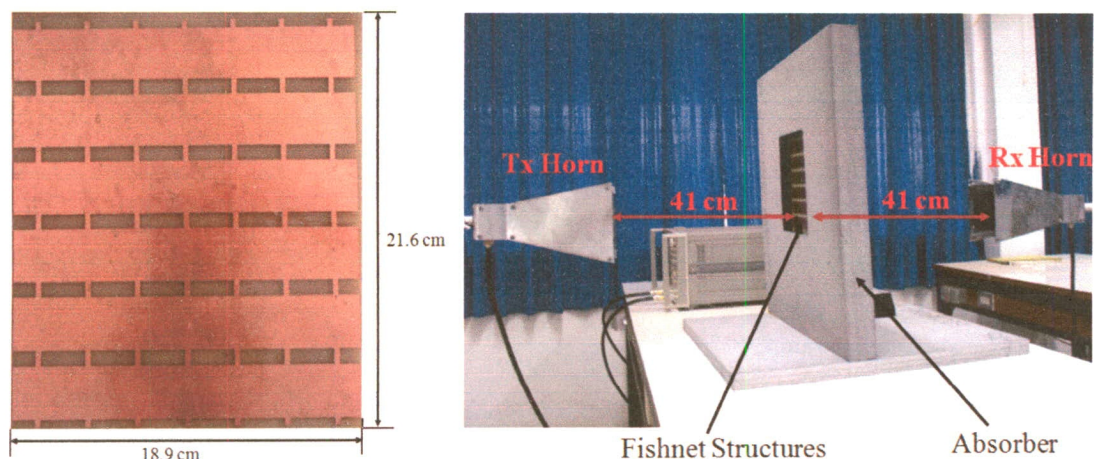


รูปที่ 2.55 ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า ค่าสภาพความซึมซาบได้ทางแม่เหล็ก และค่าดัชนีหักเหของโครงสร้างร่างแหแบบรายคาบสองและสามชั้น

การสร้างและวัดคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง

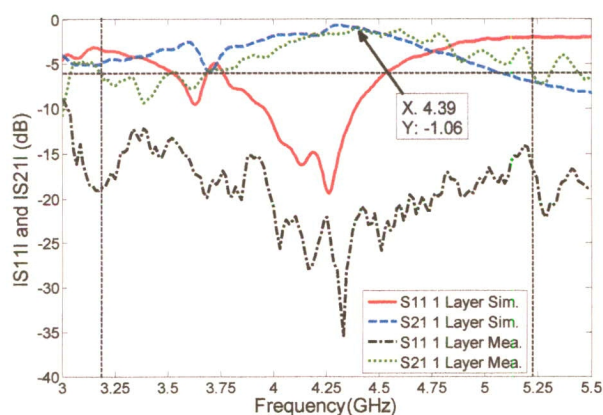
โครงสร้างที่ออกแบบได้จะถูกนำไปสร้างด้วยกระบวนการกัดลายแผ่นปรินต์ (PCB) หลังจากนั้นก็จะนำไปวัดคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อนของคลื่น อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ประกอบด้วย (1) สายอากาศฮอร์น (Horn Antenna) (2) เครื่อง Network Analyzer (3) แผ่นดูดซับคลื่น (Absorber) การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับวัดโครงสร้างร่างแหมีลักษณะดังรูปที่ 2.56

การวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อนกลับของคลื่นของโครงสร้างร่างแหนี้จะใช้ Vector Network Analyzer (HP8753D) ที่สามารถวัดได้ในช่วงความถี่ 300 MHz – 6 GHz ซึ่งสามารถวัดได้ทั้งเฟสและขนาดของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและสัมประสิทธิ์การสะท้อน ในการวัดจะใช้สายอากาศฮอร์นเป็นตัวรับและส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และใช้แผ่นดูดซับคลื่น (Absorber AN#77) เจาะรูเพื่อวางโครงสร้างไว้ข้างในแผ่น ซึ่งเหตุผลที่ต้องใช้แผ่นดูดซับคลื่น เพราะแผ่นดูดซับคลื่นจะทำหน้าที่ดูดซับคลื่นที่ไม่ต้องการ ซึ่งจะทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ถูกต้อง สำหรับการตำแหน่งการวางสายอากาศฮอร์นนั้นจะวางห่างกันมากกว่าสองเท่าของระยะ Far Field (วัดระหว่างปากสายอากาศฮอร์น) ซึ่งจะทำให้คลื่นที่วัดได้นั้นเป็นระนาบคลื่น (Plane Wave)



รูปที่ 2.56 อุปกรณ์และการติดตั้งการทดลอง

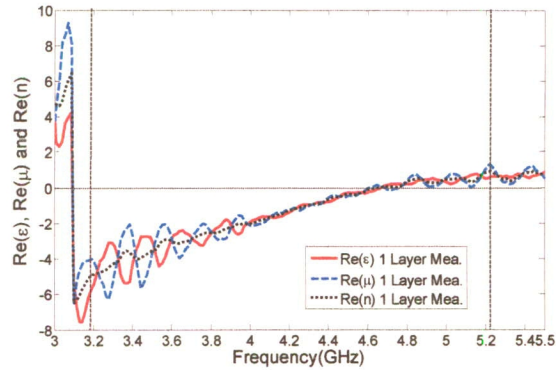
ผลการวัดคุณสมบัติของโครงสร้างที่ออกแบบแสดงในรูปที่ 2.57 เป็นการแสดงการเปรียบเทียบค่าของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อนของโครงสร้างที่ได้จากการจำลองในคอมพิวเตอร์ และจากการทดสอบโครงสร้างที่สร้างขึ้นจริง ซึ่งพบว่าลักษณะของกราฟทั้งสองมีลักษณะไปในทิศทางเดียวกันจะมีส่วนที่แตกต่างกัน คือค่าของสัมประสิทธิ์การสะท้อน ซึ่งอาจจะเกิดจากความผิดพลาดจากการสร้างวัสดุโครงสร้าง และโดยปกติแล้วค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของโครงสร้างประเภทนี้จะมีค่าต่ำ



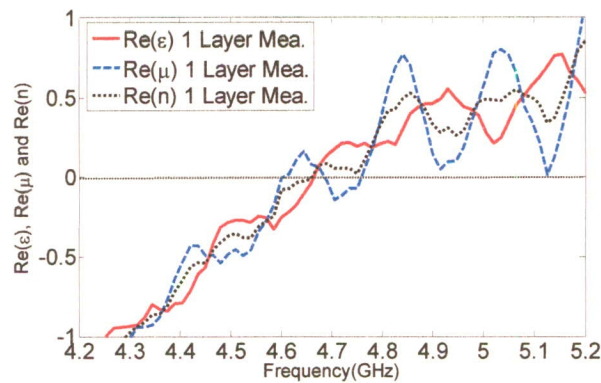
รูปที่ 2.57 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อนของโครงสร้างที่ได้จากการจำลองในคอมพิวเตอร์และจากการทดสอบโครงสร้างที่สร้างขึ้นจริง

จากค่าของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อนของโครงสร้างที่ได้จากการทดสอบโครงสร้างที่สร้างขึ้นจริง จะถูกนำไปหาค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้าง โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งค่าที่ได้แสดงในรูปที่ 2.58 ในรูปที่ 2.58 (ข) เป็นภาพขยายของค่าที่ได้พบว่าในช่วงความถี่ที่ส่งผ่านทั้งค่าสภาวะยอมทางไฟฟ้า ค่าสภาพความซึมซาบได้ทางแม่เหล็ก และค่าดัชนีหักเห นั้นมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ โดยจากภาพจะพบว่าทั้งสามค่าจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ในช่วงความถี่

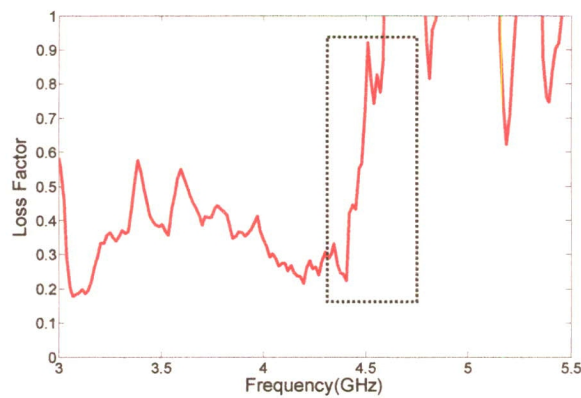
4.30 GHz – 5.20 GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่คลื่นส่งผ่านได้พอดี และถ้าหากพิจารณาที่ค่าความสูญเสียของโครงสร้าง (รูปที่ 2.58 (ค)) จะพบว่าจะมีค่าต่ำในช่วงความถี่ 4.30 GHz – 4.57 GHz ซึ่งถือว่าช่วงความถี่ดังกล่าวมีค่าดัชนีหักเหเข้าใกล้ศูนย์และมีค่าความสูญเสียต่ำ



(ก)



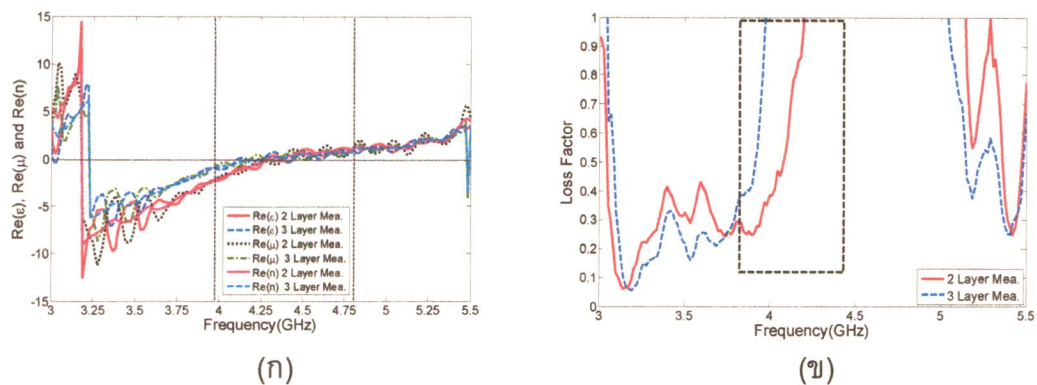
(ข)



(ค)

รูปที่ 2.58 (ก) ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า ค่าสภาพความซึมซาบได้ทางแม่เหล็ก และค่าดัชนีหักเหของโครงสร้างร่างแหแบบรายคาบที่ได้จากการวัดจริง (ข) ภาพขยายของรูป (ก) และ (ง) ค่าความสูญเสียของโครงสร้าง

เมื่อทดสอบค่าของโครงสร้างร่างแหแบบรายคาบสองและสามชั้น พบว่าค่าที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลองในคอมพิวเตอร์ คือความถี่ของการส่งผ่านมีค่าลดลง และค่าดัชนีหักเหของโครงสร้างที่ได้นั้นมีค่าลดลงตามความหนาของโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.59



รูปที่ 2.59 (ก) ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า ค่าสภาพความซึบซาบได้ทางแม่เหล็ก และค่าดัชนีหักเหของโครงสร้างร่างแหแบบรายคาบที่ได้จากการวัดจริง และ (ข) ค่าความสูญเสียของโครงสร้าง

ผลจากการวัดค่าจริงของโครงสร้างร่างแหแบบรายคาบทั้งที่เป็นแบบชั้นเดียว สองและสามชั้นมีแนวโน้มคล้ายกับแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ อย่างไรก็ตามก็ยังคงมีความผิดพลาดเกิดขึ้น อันเนื่องมาจากขั้นตอนของการสร้างและการวัดที่ไม่สมบูรณ์ โดยในการสร้างนั้นโครงสร้างทั้งสองด้านอาจจะเกิดการทับกันไม่สนิทตามแบบที่ได้ออกแบบไว้ ขณะที่การวัดนั้นวัดโดยใช้สายอากาศที่ได้สร้างขึ้นเอง จึงมีความคลาดเคลื่อนบ้าง

จากผลที่ได้จากการประมวลผลทางคอมพิวเตอร์ทั้งสองแบบรวมทั้งการวัดผลจริง พบว่าแบนด์วิธของช่วงที่ดัชนีหักเหที่เข้าใกล้ศูนย์ไม่กว้างนัก รวมถึงค่าอัตราการสูญเสียในช่วงดังกล่าวก็ยังคงมีค่าที่สูง ซึ่งค่าดังกล่าวยังสามารถทำให้ดีขึ้นได้ โดยการหาค่าที่ดีที่สุดของโครงสร้าง (Optimization) โดยการปรับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงสร้างร่างแหดังรายการต่อไปนี้

1. ความกว้างของแผ่นหนา (w_s)
2. ความกว้างของส่วนคอ (w_n)
3. ความยาวของแผ่นหนา (l_s)
4. ความยาวของส่วนคอ (l_n)

โดยการปรับพารามิเตอร์แต่ละตัวก็จะทำให้มีผลต่อตำแหน่งของความถี่เรโซแนนซ์ของโครงสร้างและจากลักษณะของโครงสร้างจะพบว่าการปรับที่ส่วนของแผ่นหนาจะทำให้คุณสมบัติ

ทางแม่เหล็กของโครงสร้างเปลี่ยนไป และการปรับที่ส่วนคอของโครงสร้างจะทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของโครงสร้างเปลี่ยนไป

2.3 วัสดุปิดกั้นคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกนำมาประยุกต์ใช้ในหลายๆ ด้าน เช่น ทางทางการแพทย์ ทาง การทหาร และ การสื่อสารทั่วไป ดังนั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งที่มนุษย์เราสัมผัสอยู่ทุกวัน แต่เราไม่สามารถมองเห็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ด้วยตาเปล่า ดังนั้นจึงไม่สามารถทราบได้ว่าในบริเวณใดๆ มีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่มากน้อยเพียงใด หรือไม่มีเลย นอกจากจะใช้เครื่องมือที่เฉพาะในการวัดค่า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้งานด้านการสื่อสารทั่วไปไม่มีอันตรายเนื่องจากกำลังวัตต์น้อย แต่ก็มีความเสี่ยงแม่เหล็กไฟฟ้าบางชนิดที่เป็นอันตราย เช่น คลื่นเอ็กซ์เรย์ (X-Ray) ที่ใช้ทางการแพทย์ และ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ใกล้สถานีฐานการรับและส่งการสื่อสาร ซึ่งเป็นคลื่นที่มีความเข้มของสัญญาณสูง เพื่อการสื่อสารในระยะทางที่ไกล

โดยปกติคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถทะลุผ่านวัสดุได้เกือบทุกชนิด แตกต่างกันไปตามความหนาของวัสดุและความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นๆ วัสดุที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถส่งผ่านได้ จะเป็นชนิดที่ไม่นำไฟฟ้า ซึ่งเรียกวัดชนิดนี้ว่า “วัสดุไดอิเล็กตริก”(Dielectric) ส่วนวัสดุที่คลื่นไม่สามารถส่งผ่านได้จะมีความสามารถในการนำไฟฟ้า เรียกวัดชนิดนี้ว่า “วัสดุตัวนำ” แต่มีวัสดุพิเศษอีกชนิดหนึ่งที่ไม่นำไฟฟ้าและป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ วัสดุชนิดนี้เป็นวัสดุที่ถูกสร้างขึ้นมาด้วยลักษณะที่พิเศษเพื่อให้สามารถปิดกั้นและดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไว้ทั้งหมด เราเรียกวัดชนิดนี้ว่า “วัสดุปิดกั้น” (Blocking and Shielding Materials) และ “วัสดุดูดซับ” (Absorbers)

วัสดุตัวนำทุกชนิดสามารถป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ในทุกช่วงความถี่ ดังนั้นถ้านำวัสดุตัวนำที่มีความหนาที่พอเพียงมาเคลือบห้องทั้งหมด คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ในห้องนั้นได้ในกรณีที่แหล่งจ่ายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ภายนอกห้องที่ถูกเคลือบด้วยวัสดุตัวนำ หลักการนี้ถูกนำไปใช้ในการสร้างห้องป้องกันคลื่นสัญญาณ เช่น ห้องทดลองทางวิทยาศาสตร์ ห้องป้องกันคลื่นรังสีจากดวงอาทิตย์ในยานอวกาศ

วัสดุปิดกั้นและดูดซับสามารถป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้เช่นเดียวกับวัสดุตัวนำ แต่มี “ช่วงความถี่” หรือ “แบนด์วิดท์ (Bandwidth)” ที่ป้องกันได้เป็นช่วงๆ ต่างจากวัสดุตัวนำ วัสดุปิดกั้นและดูดซับมีราคาสูงกว่าวัสดุตัวนำไฟฟ้า มีขายในท้องตลาดทั่วไป มีแบนด์วิดท์ในการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหลายกิกะเฮิรตซ์ (GHz) ซึ่งจัดว่าเป็นช่วงความถี่ที่กว้าง ดังนั้นในปัจจุบันจึงยังไม่มีวัสดุชนิดใดที่ใช้ป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบช่วงความถี่แคบ

วัสดุปิดกันและดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีอยู่หลายแบบ มีหลักการและวิธีการสร้างแตกต่างกันไป เช่น

- รายงานการวิจัยเรื่อง “Broadband Electromagnetic-Wave Absorption by FeCo/C Nanocapsules” ตีพิมพ์ในวารสาร Applied Physics Letters ปี 2009 กล่าวถึงการออกแบบและสร้างวัสดุดูดซับ ด้วยการผสมวัสดุเข้าด้วยกัน Iron Cobalt และ Carbon (FeCo/C) ซึ่งมีช่วงความถี่ที่สามารถดูดซับคลื่นได้ประมาณ 4 GHz และใช้งานได้ในเฉพาะความถี่ระหว่าง 2 GHz – 18 GHz

- สินค้าชื่อ “PU Foam Based RF & Microwave Absorbers EMC / RFI Absorbers” ของแบรนด์ LOPU เป็นวัสดุดูดซับรูปร่างพีรามิต

- สินค้าชื่อ “VeilShield” ของบริษัท “Less EMF Inc.” เป็นวัสดุดูดซับแบบโปร่งแสง และโค้งงอได้

- สินค้าภายใต้แบรนด์ “Eccosorb” ของบริษัท “Emerson & Cuming Microwave Products N.V.” เป็นวัสดุดูดซับมีทั้งแบบแผ่นเรียบและแบบรูปทรงพีรามิต มีลักษณะทึบแสงและโค้งงอได้

วัสดุสำหรับป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันยังมีคุณสมบัติเป็นแบบช่วงความถี่กว้าง ซึ่งไม่สามารถนำไปใช้ได้กับงานบางชนิด เช่น การตัดสัญญาณการสื่อสารในช่วงความถี่แคบ เป็นต้น

การป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่แคบ จำเป็นต้องอาศัยคุณสมบัติพิเศษของวัสดุ ซึ่งวัสดุที่มีอยู่ตามธรรมชาติทั่วไปไม่สามารถทำได้ การผสมธาตุบางชนิดเข้าด้วยกันก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีผู้นำไปใช้ในการสร้างวัสดุปิดกันคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าวิธีการนี้ทำให้คุณสมบัติโดยรวมของวัสดุแตกต่างออกไป แต่อย่างไรก็ตาม ก็ยังไม่สามารถทำให้ได้วัสดุที่สามารถป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงความถี่แคบได้

ในปี ค.ศ. 2000 ได้มีการค้นพบวัสดุชนิดใหม่ที่เรียกว่าวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ (Artificial Electromagnetic Materials หรือ Metamaterials) วัสดุนี้สามารถให้คุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าตามที่ต้องการ จึงสามารถนำไปใช้ในการออกแบบและพัฒนาสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ ให้มีคุณภาพดีขึ้น เนื่องจากเป็นวัสดุที่สามารถควบคุมคุณลักษณะทางไฟฟ้าของวัสดุได้ ซึ่งวัสดุที่มีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติไม่สามารถทำได้

วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์มีรูปร่างและโครงสร้างไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับการออกแบบเพื่อให้ได้คุณสมบัติทางไฟฟ้าตามที่ต้องการ เช่น

- งานวิจัยเรื่อง “การศึกษาตัวแปรของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์เชิงแสงด้วยรูปทรงเกลียวที่ทำจากทอง (Gold Helix Photonic Metamaterials: A Numerical Parameter Study)” ตีพิมพ์ในวารสาร OPTICS EXPRESS เดือนมกราคม ค.ศ. 2010 กล่าวถึงโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ที่มีรูปร่างเป็นแบบเกลียว (Helix)

- งานวิจัยเรื่อง “สัมประสิทธิ์การหักเหติดลบเนื่องจากค่าไคเรล (Negative Refractive Index Due to Chirality)” ตีพิมพ์ในวารสาร PHYSICAL REVIEW ปี ค.ศ. 2009 กล่าวถึงโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ที่มีรูปร่างเป็นแบบกากบาท (Cross wire) 4 แขน

- งานวิจัยเรื่อง “การศึกษาและวิเคราะห์วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์แบบไอโซโทปิกประเภทไคเรลชนิดมือซ้าย (Left-Handed Chiral Isotropic Metamaterials: Analysis and Detailed Numerical Study)” ตีพิมพ์ในวารสาร Optics A ปี ค.ศ. 2009 กล่าวถึงโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ ที่มีรูปร่างเป็นแบบซีเอ็น (Cn)

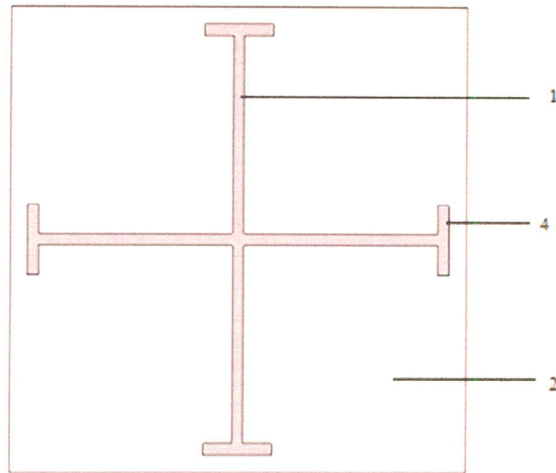
จากงานวิจัยและปัญหาที่กล่าวมาก่อนหน้า จึงมีการพัฒนาและคิดค้นวัสดุปิดกั้นคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น โดยออกแบบและประดิษฐ์ส่วนโครงสร้างของวัสดุปิดกั้นคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าให้แตกต่างออกไป เพื่อปิดกั้นและดูดซับคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าแบบช่วงความถี่แคบ ซึ่งสามารถเพิ่มหรือลดจำนวนช่วงความถี่จะป้องกันได้ตามขนาดของวัสดุปิดกั้นคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างขึ้น โดยนำไปเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างกลุ่มอาร์เรย์ (Array) เพื่อใช้ปิดกั้นและดูดซับคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า

วัสดุปิดกั้นคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกแบบ มีลักษณะเป็นชั้นวัสดุวางเรียงซ้อนเชื่อมต่อกัน ซึ่งนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของโครงสร้างกลุ่มอาร์เรย์ โดยวัสดุปิดกั้นคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้างดกล่าว ประกอบด้วยชั้นวัสดุ 3 ชั้น คือ

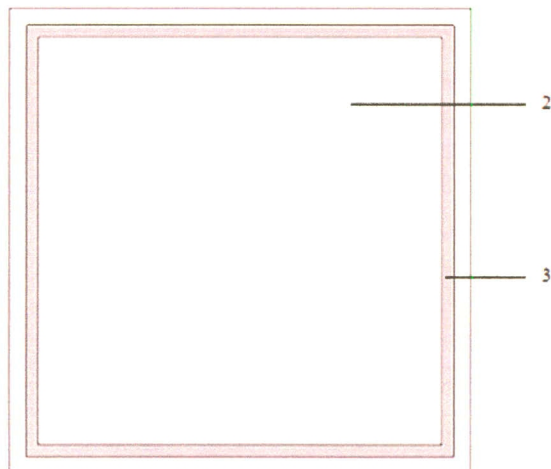
- ชั้นโครงสร้างที่หนึ่ง ซึ่งทำจากวัสดุตัวนำไฟฟ้า มีลักษณะโครงสร้างรูปเครื่องหมายบวก (+)

- ชั้นซับสเตรท (Substrate layer) มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม ทำจากวัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric)

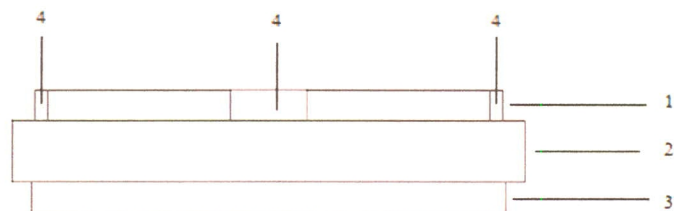
- ชั้นโครงสร้างที่สอง เป็นวัสดุนำไฟฟ้า ที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างกรอบแผ่นสี่เหลี่ยม ความมุ่งหมายของการประดิษฐ์นี้คือ สร้างวัสดุปิดกั้นคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าแบบช่วงความถี่แคบที่สามารถเพิ่มหรือลดจำนวนช่วงความถี่ที่จะป้องกันได้



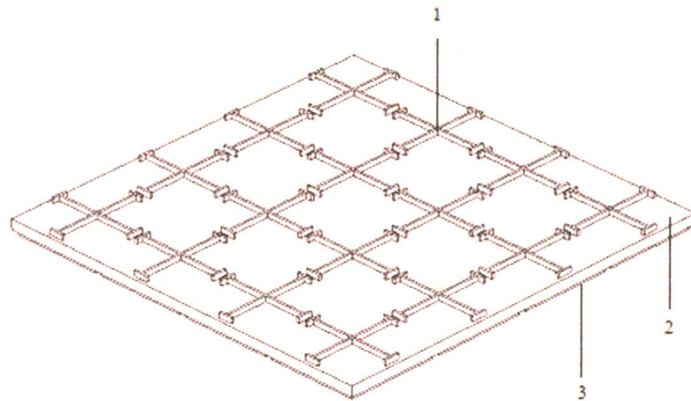
รูปที่ 2.60. โครงสร้างด้านบนของวัสดุปิดกั้นคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 2.61 โครงสร้างด้านล่างของวัสดุปิดกั้นคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 2.62. ภาพตัดขวางหน่วยโครงสร้างวัสดุปิดกั้นคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าตามการประดิษฐ์



รูปที่ 2.63. การเชื่อมต่อหน่วยวัสดุปิดกั้นคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าตามการประดิษฐ์เข้าด้วยกัน

รายละเอียดการออกแบบวัสดุปิดกั้นคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า

วัสดุปิดกั้นคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้ามีลักษณะเป็นชั้นวัสดุวางเรียงซ้อนเชื่อมต่อกัน โดยวัสดุปิดกั้นคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบด้วยชั้นวัสดุ 3 ชั้น (ดังแสดงในรูปที่ 1-3) ดังนี้

- **ชั้นโครงสร้างที่หนึ่ง (1)** ซึ่งอยู่ด้านบนสุดของวัสดุปิดกั้นคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าโดยทำหน้าที่ควบคุมค่าความเก็บประจุระหว่างชั้นโครงสร้างที่สอง (3) กับโครงสร้างอื่นเพื่อใช้ควบคุมกว้างของช่วงความถี่ของการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

โดยที่ชั้นโครงสร้างที่หนึ่ง (1) เป็นชั้นที่ทำจากวัสดุตัวนำไฟฟ้า มีลักษณะเป็นโครงสร้างรูปเครื่องหมายบวก (+) โดยที่แขนของโครงสร้างรูปเครื่องหมายบวก (+) ดังกล่าว มีขนาดความยาวเท่ากันทั้งหมด และที่ปลายแขนของเครื่องหมายบวก (+) แต่ละแขนดังกล่าว จะมีแขน (4) เชื่อมต่อตั้งฉากกับปลายแขนของโครงสร้างรูปเครื่องหมายบวก (+) นั้น โดยที่แขน (4) มีขนาดความยาวอยู่ระหว่าง 0.1 – 1 เท่า ของขนาดความยาวโครงสร้างรูปเครื่องหมายบวก (+) ดังกล่าว

- **ชั้นซับสเตรท (Substrate layer) (2)** เป็นชั้นที่เชื่อมต่ออยู่ด้านล่างของชั้นที่ 1 ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ทำจากวัสดุไดอิเล็กตริก ทำหน้าที่ควบคุมค่าความถี่ของการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และเป็นฉนวนกั้นระหว่างชั้นโครงสร้างที่หนึ่ง (1) และชั้นโครงสร้างที่สอง (3) ไม่ให้เชื่อมต่อกัน

- **ชั้นโครงสร้างที่สอง (3)** เป็นชั้นที่อยู่ด้านล่างสุดทำหน้าที่ป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ที่ตั้งไว้ และสร้างค่าความเก็บประจุกับชั้นโครงสร้างที่หนึ่ง (1) โดยชั้นโครงสร้างที่สอง (3) เชื่อมต่ออยู่ด้านล่างของชั้นซับสเตรท (2) ซึ่งชั้นโครงสร้างที่สอง (3) ดังกล่าว ทำจาก

วัสดุนำไฟฟ้า ที่มีลักษณะรูปร่างเป็นกรอบสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยความกว้างของชั้นโครงสร้างที่สอง (3) นั้น มีขนาดเท่ากับความกว้างของชั้นโครงสร้างที่หนึ่ง (1)

การประยุกต์เพื่อนำวัสดุปิดกั้นคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าไปใช้ประโยชน์

ในการปรับค่าช่วงการปิดกั้นคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ต่างๆ สามารถทำได้โดย ถ้าต้องการเปลี่ยนความถี่ในการทำงานเพียงเล็กน้อยสามารถทำได้โดยการปรับขนาดวัสดุปิดกั้นคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าให้มีขนาดเล็ก หรือเพิ่มขนาดขึ้นให้มีขนาดลดหลั่นกันไป แต่ถ้าต้องการปรับความถี่การทำงานในย่านความถี่ที่ต่างกันมาก เช่น ในระดับเมกะเฮิรตซ์ กิโลเฮิรตซ์ หรือ กิกะเฮิรตซ์ จะต้องปรับเปลี่ยนชนิดของวัสดุไดเรกทริกบนชั้นซับสเตรต (2) เพื่อให้มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป โดยถ้าต้องการปิดกั้นคลื่นความถี่ต่ำ เพื่อใช้คลื่นในช่วงความถี่ต่ำ ให้เปลี่ยนชนิดวัสดุไดเรกทริกให้ที่มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าต่ำ และถ้าต้องการปิดกั้นคลื่นความถี่สูง เพื่อต้องการใช้ความถี่สูงให้เปลี่ยนชนิดวัสดุไดเรกทริก ให้ที่มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสูง

สำหรับขนาดความกว้างและความหนาของหน่วยโครงสร้างวัสดุปิดกั้นคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า 1 หน่วย ที่สร้างขึ้น จะขึ้นอยู่กับความถี่ที่นำไปใช้งาน โดยที่ขนาดโครงสร้างวัสดุปิดกั้นคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า ที่จะนำไปใช้ปิดกั้นช่วงความถี่คลื่นค่าหนึ่งนั้น ตัวขนาดกว้างของโครงสร้างวัสดุปิดกั้นคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า 1 หน่วย หรือ 1 โครงสร้างในโครงสร้างกลุ่มอาร์เรย์จะต้องมีขนาด อยู่ระหว่าง 2 - 10 เท่า ของความยาวคลื่นที่ต้องการปิดกั้นดังกล่าว เช่น ถ้าต้องการปิดกั้นความถี่ที่มีค่าความยาวคลื่น 500 มิลลิเมตร จะต้องสร้างวัสดุปิดกั้นคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีขนาด 10-50 มิลลิเมตร เป็นต้น

สำหรับการจัดเรียงเชื่อมต่อวัสดุปิดกั้นคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อป้องกันหรือปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่แคบ สามารถจัดเรียงเชื่อมต่อวัสดุปิดกั้นคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าได้ 3 รูปแบบดังนี้

- แบบที่ 1 วางเรียงต่อกันในระนาบเดียวกัน โดยการเชื่อมต่อวัสดุปิดกั้นคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าด้วยกันตามแนวระนาบ นั้น ทำได้โดยเชื่อมต่อชั้นซับสเตรต (2) แต่ละอันเข้าด้วยกัน (ดังแสดงในรูปที่ 2.63) และมีเงื่อนไขว่าแต่ละหน่วยวัสดุต้องเหมือนกันทุกประการ จะได้วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ที่สามารถป้องกันแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่แคบ ชนิดความถี่เดียว

- แบบที่ 2 นำวัสดุปิดกั้นคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีขนาดแตกต่างกันมาวางเรียงเชื่อมต่อกันจะได้วัสดุปิดกั้นคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ที่สามารถป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่แคบ ได้ในช่วงความถี่ตามที่ออกแบบไว้ ขึ้นอยู่กับขนาดของโครงสร้างที่แตกต่างกัน

- แบบที่ 3 วางซ้อนกัน โดยนำวัสดุปิดกันคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้ามาวางซ้อนกันให้มีระยะห่าง โดยบริเวณระหว่างหน่วยวัสดุที่วางซ้อนกันจะต้องมีชั้นอากาศกัน หรือสามารถใช้วัสดุที่มีสภาพยอมทางไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับอากาศ โดยวัสดุปิดกันคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่วางซ้อนกันมีขนาดเดียวกันจะสามารถป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ในช่วงความถี่แคบ ชนิดความถี่เดียว แต่ถ้าวัสดุปิดกันคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่วางซ้อนกันมีขนาดโครงสร้างต่างกันจะสามารถป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่แคบ ชนิดหลายความถี่

สำหรับการจัดวางเรียงเชื่อมต่อกันของวัสดุปิดกันคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถวางซ้อนกันหรือวางเรียงเชื่อมต่อกันได้ไม่จำกัดจำนวนชั้นหรือจำนวนหน่วยวัสดุ โดยสามารถจัดเรียงหน่วยวัสดุทั้ง 3 รูปแบบ ผสมเข้าด้วยกันได้ตัวอย่างเช่น วางหน่วยวัสดุปิดกันคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าซ้อนกันหลายชั้น และแต่ละชั้นประกอบด้วยหน่วยวัสดุที่มีขนาดโครงสร้างต่างกัน จะได้วัสดุปิดกันคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ที่มีคุณสมบัติป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้หลายช่วงความถี่แคบ

2.4 วัสดุป้องกันคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านรังสีเอ็กซ์

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกใช้งานอย่างหลากหลายในปัจจุบัน ยกตัวอย่างเช่น การสื่อสารในย่านวิทยุซึ่งใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ในระดับเมกะเฮิร์ต (MHz) การสื่อสารทางโทรศัพท์เคลื่อนที่และดาวเทียมใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ในระดับกิกะเฮิร์ต (GHz) การสื่อสารแบบใช้แสงด้วยสายไฟเบอร์ (Optical Fiber) ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ในระดับแสงหรือเทระเฮิร์ต (THz) เป็นต้น นอกจากนั้นแล้วยังมีการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านรังสีเอ็กซ์ (X-ray) ในทางการแพทย์ แต่เนื่องจากเป็นย่านที่พลังงานสูงทำให้รังสีนั้นสามารถทำลายเนื้อเยื่อของมนุษย์ได้ ซึ่งผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการฉายรังสีต่าง ๆ นั้นจะต้องได้รับการป้องกันไม่ว่าจะเป็นชุดป้องกันลำตัว ต่อมไทรอยและดวงตา ซึ่งตามมาตรฐานนั้นอุปกรณ์ป้องกันรังสีนั้นทำจากตะกั่วที่มีความหนาเท่ากับ 0.1 ถึง 1.0 มิลลิเมตร ขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในขณะนั้นๆ เนื่องจากตะกั่วเป็นโลหะหนักทำให้ลดทอนคลื่นได้ดีและมีราคาถูกจึงนิยมใช้ แต่มีข้อเสียคือมีน้ำหนักมาก ชุดป้องกันคลื่นรังสีเอ็กซ์จะมีน้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 5-6 กิโลกรัมทำให้ผู้สวมใส่มีปัญหาเกี่ยวกับอาการปวดหลังเมื่อใส่เป็นเวลานาน อีกทั้งตะกั่วเป็นสารพิษเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ (Metamaterials) คือวัสดุที่สามารถทำให้เกิดคุณสมบัติพิเศษ สามารถกำหนดคุณสมบัติทางไฟฟ้าได้ เช่น ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Permittivity : ϵ) และค่าความซึมซาบได้ทางแม่เหล็ก (Permeability : μ) เป็นต้น โดยวัสดุดังกล่าวนั้นถูกสร้างขึ้นจากโครงสร้างเรโซแนนซ์ที่จัดเรียงเป็นแถวลำดับคาบ (Period) เนื่องจากวัสดุจะ

ประกอบด้วยโครงสร้างที่มีขนาดเล็ก (ค่าน้อยกว่าความยาวคลื่น) จำนวนมาก ทำให้วัสดุมีความเป็นเนื้อเดียว (Homogenous) ซึ่งการออกแบบโครงสร้างเล็กๆ บนวัสดุดังกล่าวสามารถทำให้เกิดคุณสมบัติพิเศษขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ออกแบบให้วัสดุมีค่าดัชนีหักเหติดลบ (Negative Refractive Index) มีค่าดัชนีหักเหสูง (High Refractive Index) หรือมีค่าดัชนีหักเหที่เข้าใกล้ศูนย์ (Near-Zero Refractive Index) วัสดุที่มีคุณสมบัติไครเรล (Chiral) ซึ่งคุณสมบัติไครเรล คือวัสดุที่เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใดๆ เคลื่อนที่ผ่านวัสดุนี้แล้วทำให้เกิดการดูดกลืนและทำให้คลื่นเกิดการหมุนเป็นแบบวงรีซึ่งการออกแบบวัสดุดังกล่าวนั้นสามารถกำหนดช่วงความถี่ที่ต้องการได้ เป็นต้น ด้วยคุณสมบัติดังกล่าว จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลาย เช่น สายอากาศที่สามารถควบคุมทิศทางได้ (Directional Antennas) ตัวกรองสัญญาณ (Filters) เซ็นเซอร์ (Sensors) อุปกรณ์ดูดซับคลื่น (Absorbers) นำไปประยุกต์ใช้ในท่อนำคลื่น (Waveguides) เป็นต้น

วัสดุป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านรังสีเอ็กซ์ มาตรฐานคือการใช้แผ่นตะกั่วที่มีความหนาเท่ากับ 0.1 ถึง 1 มิลลิเมตร ความหนาที่ใช้นั้นขึ้นอยู่กับพลังงานที่ต้องการจะป้องกัน เนื่องจากแผ่นตะกั่วนี้มีน้ำหนักมาก เมื่อทำเป็นเสื้อหรือชุดสวมใส่ทำให้ผู้สวมใส่เกิดอาการเจ็บปวดหลัง กล้ามเนื้อเมื่อยล้าเป็นเวลานาน

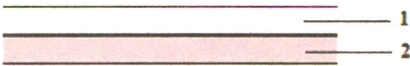
โดยในปัจจุบันจึงมีงานวิจัยที่ศึกษาการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านรังสีเอ็กซ์ ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัย “Optimizing non-Pb radiation shielding materials using bilayers” ตีพิมพ์ในวารสาร MEDICAL PHYSICS ในปี ค. ศ. 2009 กล่าวถึงการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านรังสีเอ็กซ์ โดยใช้แผ่นวัสดุสองชั้น โดยใช้วัสดุคือพลวง (Antimony, Sb) กับบิสมัท (Bismuth, Bi) พลวง (Antimony, Sb) กับทังสเตน (Tungsten, W) และแบเรียม (Barium, Ba) กับบิสมัท (Bismuth, Bi)

งานวิจัย “Polymer-composite materials for radiation protection” ตีพิมพ์ในวารสาร APPLIED MATERIALS AND INTERFACES ในปี ค.ศ. 2012 กล่าวถึงการป้องกันคลื่นด้วยวัสดุที่เป็นยางผสม (Polymer-composite materials) เป็นต้นนอกจากงานวิจัยแล้ว ยังมีสิทธิบัตรประเทศไทยชื่อ “วัสดุป้องกันรังสีเอ็กซ์และกระบวนการสำหรับผลิตวัสดุนี้” กล่าวถึงการใช้วัสดุที่มีส่วนผสมระหว่าง BaSO_4 กับยางพารา สำหรับป้องกันรังสีเอ็กซ์

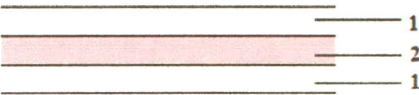
จากข้างต้นจึงมีแนวคิดที่จะประดิษฐ์วัสดุที่สามารถป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านรังสีเอ็กซ์โดยใช้นาโนวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์มาจัดเรียงเชื่อมต่อเรียงเป็นชั้นร่วมกับวัสดุนาโนไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้ช่วยทำให้การป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านรังสีเอ็กซ์ได้ดีขึ้น

วัสดุป้องกันคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านรังสีเอ็กซ์นี้ มีลักษณะเรียงเป็นชั้นๆ ซึ่งประกอบด้วยชั้นดูดซับคลื่นและชั้นวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์จำนวนหนึ่ง ซึ่งสามารถป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านรังสีเอ็กซ์

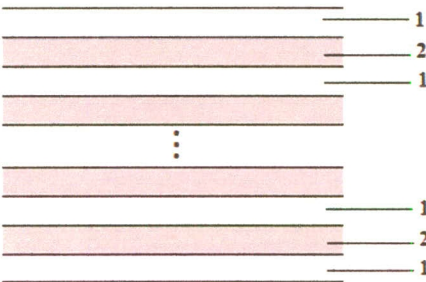
ความมุ่งหมายของการประดิษฐ์นี้คือ สร้างวัสดุที่สามารถป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ในย่านรังสีเอ็กซ์ชนิดใหม่ ที่มีน้ำหนักเบากว่าและสามารถป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านดังกล่าวได้ดีกว่าวัสดุมาตรฐานที่ใช้ในปัจจุบัน



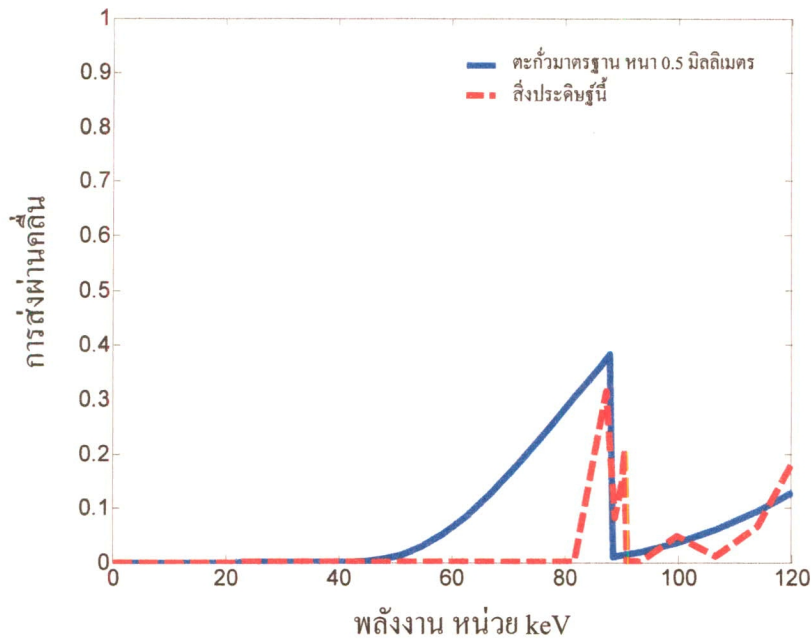
รูปที่ 2.64. โครงสร้างของวัสดุป้องกันคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านรังสีเอ็กซ์



รูปที่ 2.65. โครงสร้างของวัสดุป้องกันคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านรังสีเอ็กซ์ที่มีชั้นดูดซับคลื่น (1) จำนวน 2 ชั้น



รูปที่ 2.66. โครงสร้างของวัสดุป้องกันคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านรังสีเอ็กซ์ที่มีชั้นดูดซับคลื่น (1) และชั้นวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ (2) จำนวนหนึ่ง



รูปที่ 2.67. การเปรียบเทียบการส่งผ่านของคลิ่นระหว่างวัสดุป้องกันคลิ่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านรังสีเอ็กซ์แบบเดิม (ตะกั่ว) กับวัสดุป้องกันคลิ่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านรังสีเอ็กซ์ที่ได้ออกแบบ

รายละเอียดการออกแบบวัสดุป้องกันคลิ่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านรังสีเอ็กซ์

วัสดุป้องกันคลิ่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านรังสีเอ็กซ์ มีลักษณะเป็นชั้นแผ่นวัสดุเรียงเชื่อมต่อกันเป็นชั้นๆ ประกอบด้วย

- ชั้นดูดซับคลิ่น (1) ทำหน้าที่ดูดซับพลังงานในย่านรังสีเอ็กซ์ ซึ่งวัสดุที่ใช้ทำชั้นดูดซับคลิ่นเป็นวัสดุนำไฟฟ้า สามารถเลือกได้จากบิสมัท (Bismuth, Bi) แบเรียม (Barium, Ba) ทังสแตน (Tungsten, W) ทองแดง (Copper, Cu) เงิน (Silver, Ag) ทอง (Gold, Au) อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือส่วนผสมของวัสดุนำไฟฟ้างกล่าวตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป

- ชั้นวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ (2) เป็นชั้นที่เชื่อมต่ออยู่ด้านล่างของชั้นดูดซับคลิ่น (1) โดยชั้นวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ (2) ทำหน้าที่ช่วยเพิ่มการป้องกันคลิ่นแม่เหล็กไฟฟ้าและมีค่าดัชนีหักเหเข้าใกล้ศูนย์

สำหรับวัสดุป้องกันคลิ่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านรังสีเอ็กซ์สามารถมีจำนวนชั้นดูดซับคลิ่น (1) ตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไป หรือจำนวนหนึ่งได้ โดยที่ระหว่างชั้นดูดซับคลิ่น (1) จะมีชั้นวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ (2) เชื่อมกันอยู่ระหว่างกลาง

ในทางเดียวกัน วัสดุป้องกันคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านรังสีเอ็กซ์สามารถมีจำนวนชั้นวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ (2) ตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไป หรือจำนวนหนึ่งได้ โดยที่ระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ (2) จะมีชั้นดูดซับคลื่น (1) เชื่อมคั่นอยู่ระหว่างกลาง

วัสดุป้องกันคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านรังสีเอ็กซ์ สามารถป้องกันรังสีได้ เทียบเท่ากับวัสดุมาตรฐานหรือดีกว่าขึ้นอยู่กับการออกแบบจำนวนชั้นและความหนาของวัสดุ สำหรับวัสดุมาตรฐานคือตะกั่วที่มีความหนา 0.25 0.35 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร

การประยุกต์เพื่อใช้ประโยชน์

สำหรับการนำวัสดุป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปใช้ประโยชน์ ยกตัวอย่าง เช่น การทำเสื้อป้องกันรังสีเอ็กซ์ ม่านหรือฉากกัน ประตู่ กระฉาก แวนตา เป็นต้น

จากการทดสอบเปรียบเทียบการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านรังสีเอ็กซ์ผ่านวัสดุมาตรฐานที่ใช้ป้องกันคลื่นแบบเดิม (ตะกั่ว หนา 0.5 มิลลิเมตร) กับวัสดุป้องกันคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านรังสีเอ็กซ์ ตามการประดิษฐ์ พบว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงย่านรังสีเอ็กซ์ที่แพร่กระจายผ่านวัสดุป้องกันคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านรังสีเอ็กซ์นั้น มีค่าที่ต่ำกว่าวัสดุมาตรฐาน (ดังแสดงในรูปที่ 2.67) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุป้องกันคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านรังสีเอ็กซ์ที่ได้ประดิษฐ์ขึ้น มีประสิทธิภาพป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านรังสีเอ็กซ์ได้ดีกว่าวัสดุมาตรฐานแบบเดิม อีกทั้งสิ่งประดิษฐ์นี้ไม่ใช่ตะกั่วจึงไม่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย