สารบัญ

คำนำ ก

สารบัญตาราง ค

สารบัญภาพ ง

บทที่ 1 บทนำ

Meta-materials ทำไมจึงเหนือธรรมชาติ? 1

บทที่ 2 ประวัติ หลักการ ประเภท และคุณลักษณะพิเศษทางฟิสิกส์ และทางไฟฟ้า ของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์

2.1 ประวัติและหลักการของ Meta-materials 10

2.2 วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงซ้อน 16

2.3 ประเภทของ Meta-materials 20

2.4 คุณลักษณะพิเศษทางฟิสิกส์และทางไฟฟ้าของ Meta-materials 24

บทที่ 3 การออกแบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์

3.1 ทฤษฎีกลุ่ม (Group Theory) และ ทฤษฎีตำแหน่งกลุ่ม (Point Group Theory) เพื่อการวิเคราะห์และออกแบบวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงซ้อน 33

3.2 ทฤษฎีการวิเคราะห์วงจร 69

3.3 การออกแบบและคำนวณค่า Chirality 87

3.4 การหาค่าดัชนีหักเห ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า ค่าสภาพซึมซาบได้ทางแม่เหล็ก และค่าไครอลของโครงสร้าง Meta-materials 98

3.5 การหมุนทางแสงและค่ากัมมันตภาพทางแสง 101

บทที่ 4 การประยุกต์ใช้ Meta-materials ในอุปกรณ์ทางไฟฟ้าและแม่เหล็ก

4.1 การเพิ่มประสิทธิภาพในการรับและส่งในสายอากาศ 107

4.2 การควบคุมโพลาไรเซชัน 113

4.3 การแยกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ประเภทไครอล 130

4.4 เลนส์แบบสมบูรณ์แบบและวัสดุล่องหน 136

บทที่ 5 Meta-materials ปัจจุบันสู่อนาคต

5.1 สกัดจับลำแสง โซล่าห์เซลล์ทางเลือก 141

5.2 การสร้างวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์กับเทคนิคเลเซอร์ความเร็ว 10^{-15} วินาที 142

5.3 ลดเสียงลง: การคุมเสียงด้วยวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ 144

5.4 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของการเชื่อมโยงในวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ 145

ประวัติผู้เขียน 148

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	ประเภทของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงซ้อน	18
ตารางที่ 2.2	ประเภทของวัสดุ Bi-isotropic	19
ตารางที่ 3.1	ประเภทของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงซ้อนทั้ง 4 ประเภท	34
ตารางที่ 3.2	ตารางคุณลักษณะของกลุ่ม Nonaxial Symmetries	37
ตารางที่ 3.3	ตารางคุณลักษณะของกลุ่ม Cyclic Symmetries	38
ตารางที่ 3.4	ตารางคุณลักษณะของกลุ่ม C_{nh}	40
ตารางที่ 3.5	ตารางคุณลักษณะของกลุ่ม C_{nv}	42
ตารางที่ 3.6	ตารางคุณลักษณะของกลุ่ม S_n	43
ตารางที่ 3.7	ตารางคุณลักษณะของกลุ่ม D_n	44
ตารางที่ 3.8	ตารางคุณลักษณะของกลุ่ม D_{nh}	46
ตารางที่ 3.9	ตารางคุณลักษณะของกลุ่ม D_{nd}	49
ตารางที่ 3.10	ตารางคุณลักษณะของกลุ่ม Cubic	51
ตารางที่ 3.11	ตารางคุณลักษณะของกลุ่ม Linear	53
ตารางที่ 3.12	ตารางคุณลักษณะของกลุ่ม C_{2v}	56
ตารางที่ 3.13	ตารางแสดงค่ากระแสที่ขึ้นกับองค์ประกอบสมมาตรของโครงสร้าง Omega	57
ตารางที่ 3.14	ตารางคุณลักษณะของกลุ่ม C_4	60
ตารางที่ 3.15	ตารางแสดงค่ากระแสที่ขึ้นกับองค์ประกอบสมมาตรของโครงสร้าง Gammadion	61
ตารางที่ 3.16	ตัวประกอบทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นไปได้ของโครงสร้างในทุกกลุ่มโครงสร้าง	65
ตารางที่ 3.17	กลุ่มโครงสร้างที่ถูกจัดในกลุ่มชนิดของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงซ้อน	68
ตารางที่ 3.18	ค่า C_i ของรูปทรงต่างๆ	74

สารบัญภาพ

ภาพที่ 1.1	โครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ที่กระทำและมีปฏิกิริยากับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	1
ภาพที่ 1.2	วิวัฒนาการของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์	2
ภาพที่ 1.3	ตัวอย่าง (ก) โครงสร้างเส้นลวด ในยุคเริ่มต้นในปี ค.ศ. 2001 แสดงโครงสร้างเส้นลวดและโครงสร้างตัวสั่นพ้องแบบวงแหวนแยกส่วน และ (ข) ภาพแสดงการเคลื่อนที่ของแสงเมื่อผ่านวัสดุที่มีค่าดัชนีหักเหที่มีค่าติดลบ	4
ภาพที่ 1.4	(ก) วัสดุล่องหน และ (ข) ภาพแสดงผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์วัสดุล่องหน	4
ภาพที่ 1.5	(ก) โครงสร้างกากบาทหมุน ปี ค.ศ. 2009-2010 (ข) โครงสร้างเกลียว (Multiple Helices) ปี ค.ศ. 2010 และ (ค) โครงสร้างเกลียวเดี่ยว (Single Helix) ปี ค.ศ. 2010	5
ภาพที่ 2.1	โครงสร้างคาบจากการจัดเรียงตัวของเส้นลวดทองแดง (Copper Wire) ที่มีความยาวเป็นอนันต์ให้อยู่ในรูปร่างทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์	11
ภาพที่ 2.2	โครงสร้างตัวสั่นพ้องแบบวงแหวนแยกส่วน (Split Ring Resonator) ประเภท (ก) 2 และ (ข) 3 มิติเมื่อ a คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์หน่วย (Unit Cell), c คือ ความหนาของแผ่นตัวนำที่ไม่มีสภาพแม่เหล็ก (Nonmagnetic Conductor) และ d คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ	12
ภาพที่ 2.3	ค่ายังผลของค่าความซึมซาบได้ของสนามแม่เหล็ก (μ_{eff}) ของโครงสร้าง SRR ซึ่งถูกควบคุมโดยค่าความถี่สั่นพ้อง (Resonance) ของค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) ที่เกิดระหว่างแผ่นของ SRR และตัวเหนี่ยวนำ (Inductance) ที่เกิดในโครงสร้าง	12
ภาพที่ 2.4	(ก) วัสดุเหนือธรรมชาติโดยทำการรวมโครงสร้าง SRR และ Copper Wire และ (ข) กราฟแสดงผลการวัดค่าดัชนีการหักเหของแสงที่เปรียบเทียบระหว่างวัสดุเหนือธรรมชาติจริงที่ออกแบบให้มีค่าดัชนีการหักเหของแสงติดลบ เทฟลอน (Teflon) และวัสดุเหนือธรรมชาติในทางทฤษฎี	13
ภาพที่ 2.5	โครงสร้าง (ก) Capacitively Loaded Strips (CLSs) และ (ข) โครงสร้างตัวสั่นพ้องแบบวงแหวนแยกส่วนที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม (Square SRRs)	14
ภาพที่ 2.6	(ก) โครงสร้างและ (ข) วงจรไฟฟ้าของโครงสร้างตัวสั่นพ้องแบบวงแหวนแยกส่วนที่มีลักษณะเป็นรูปวงกลม (Circular SRRs)	14
ภาพที่ 2.7	(ก) โครงสร้างและ (ข) วงจรไฟฟ้าของโครงสร้างตัวสั่นพ้องแบบวงแหวนแยกส่วน	15
ภาพที่ 2.8	ตัวอย่างการวิเคราะห์วงจรของโครงสร้าง Y	15

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ 2.9	การแบ่งประเภทวัสดุไอโซทรอปิคในขั้นพื้นฐาน	17
ภาพที่ 2.10	การแบ่งประเภทย่อยของวัสดุไอโซทรอปิค	18
ภาพที่ 2.11	ทิศทางการเคลื่นที่ของพลังงาน (Poynting's Vector, $\vec{S}$)และทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น (Wave Vector, $\vec{k}$)ในการเคลื่อนที่ในตัวกลางที่เป็นวัสดุเหนือธรรมชาติที่ประพฤติตัวเป็นวัสดุ Right-Handed และ Left-Handed	27
ภาพที่ 2.12	ผลกระทบเชเรนคอฟ (ก) ในตัวกลางที่ $n > 0$ และ (ข) ในตัวกลางที่ $n < 0$ เมื่อ $\vec{v}$ คือเวกเตอร์ของความเร็ว $\vec{S}$ คือทิศทางการเคลื่อนที่ของพลังงาน (Poynting ' s Vector) และ $\vec{k}$ คือ ทิศทางการเคลื่อนที่ของเวคเตอร์คลื่น(Wave Vector)	28
ภาพที่ 2.13	เส้นทางการสะท้อนของลำแสงที่รอยต่อของสุญญากาศ ($n > 0$) และตัวกลางที่มี (ก) ค่า $n > 0$ และ (ข) $n < 0$ เมื่อ 1) คือ ลำแสงตกกระทบ (Incident Beams) 2) คือ ลำแสงสะท้อน (Reflected Beams) 3) คือ ลำแสงหักเห (Refracting Beams) $\vec{S}$ คือ ทิศทางการเคลื่อนที่ของพลังงาน และ $\vec{k}$ คือ ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น	29
ภาพที่ 3.1	โครงสร้าง 3 มิติที่มีส่วนประกอบสมมาตรสมบูรณ์	36
ภาพที่ 3.2	ตัวอย่างส่วนประกอบสมมาตร	36
ภาพที่ 3.3	แผนผังของกลุ่ม ในทฤษฎีกลุ่ม	37
ภาพที่ 3.4	โครงสร้างโมเลกุล: (ก) C_1-(S)-2-Brombutane (ข) C_i-Cyclo-(D-Ala-L-Ala) และ (ค) C_s-Propene	38
ภาพที่ 3.5	โครงสร้างโมเลกุล: (ก) C_2 - Penta-2,3-diene (ข) C_3 - 2,6,7-Trimethyl-1-aza-bicyclo[2.2.2]octane และ (ค) C_4 - Calix[4]aren Derivative	39
ภาพที่ 3.6	โครงสร้างโมเลกุล: (ก) C_{2h} - 1,4-Dibrom-2,5-dichlorbenzene (ข) C_{2h} - (*E*)-1,2-Dichlorethene และ (ค) C_{3h} - 1,3,5-Trihydroxybenzene	41
ภาพที่ 3.7	โครงสร้างโมเลกุล: (ก) C_{2v} - Formaldehyde (ข) C_{3v} - Chloroform และ (ค) C_{4v} - Calix[4]arene	43
ภาพที่ 3.8	โครงสร้างโมเลกุล: (ก) S_4 - Co_4Cp_4 (ข) S_4 - 2,3,7,8-Tetramethyl-spiro[4.4]nonane และ (ค) S_6 - [6.5]Coronane	44
ภาพที่ 3.9	โครงสร้างโมเลกุล: (ก) D_2 - Twistane (ข) D_3 - Tris(oxalato)-Iron(iii)-Complex และ (ค) D_3 - Three-fold Knot (not a real molecule)	45

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ 3.10	โครงสร้างโมเลกุล: (ก) D_{2h} - Ethene (ข) D_{4h} - $AuCl_4^-$และ (ค) D_{6h} - Benzene	48
ภาพที่ 3.11	โครงสร้างโมเลกุล: (ก) D_{2d} - Biphenyl (ข) D_{3d} - Ethane (staggered Conformation) และ (ค) D_{5d} - Ferrocene (staggered)	50
ภาพที่ 3.12	โครงสร้างโมเลกุล: (ก) T_d - *neo*-Pentane (ข) O_h - PF_6^-และ (ค) I_h - [60]Fullerene (C_{60})	53
ภาพที่ 3.13	โครงสร้างโมเลกุล: (ก) $C_{\infty v}$ - Chloracetylene (ข) $D_{\infty h}$ - Acetylene	54
ภาพที่ 3.14	โครงสร้าง Omega	55
ภาพที่ 3.15	องค์ประกอบทางสมมาตรทั้ง 4 แบบ ของโครงสร้าง Omega (ก) สมมาตรในตัวโครงสร้างเอง (ข) สมมาตรรอบแกนหมุน z (ค) ระนาบ x-y (ง) ระนาบ y-z	55
ภาพที่ 3.16	ทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในโครงสร้างจากการใส่สนามไฟฟ้าจากภายนอก ก่อนและหลังพิจารณาองค์ประกอบสมมาตรทั้ง 4 (ก) สมมาตรในตัวโครงสร้างเอง (ข) สมมาตรรอบแกนหมุน z (ค) ระนาบ x-y และ (ง) ระนาบ y-z	57
ภาพที่ 3.17	โครงสร้าง Gammadion และองค์ประกอบสมมาตรทั้งสี่ของโครงสร้าง (ก) Identity (ข) 90° (ค) 180° และ (ง) 180°	59
ภาพที่ 3.18	ทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในโครงสร้างจากการใส่สนามไฟฟ้าจากภายนอก ก่อนและหลังพิจารณาองค์ประกอบสมมาตรทั้ง (ก) Identity (ข) 90° (ค) 180° และ (ง) 180°	60
ภาพที่ 3.19	โครงสร้างในของกลุ่ม C_{3-8}	62
ภาพที่ 3.20	โครงสร้างของ C_3	62
ภาพที่ 3.21	โครงสร้างของ C_6	63
ภาพที่ 3.22	แผนภาพแสดง Subset ของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงซ้อน	68
ภาพที่ 3.23	ค่า Inductance ของโครงสร้างพื้นฐาน	71
ภาพที่ 3.24	โครงสร้างชิ้นส่วน Microstrip	71
ภาพที่ 3.25	โครงสร้างชิ้นส่วน Circular Loop	72
ภาพที่ 3.26	โครงสร้างชิ้นส่วน Circular Spiral	73
ภาพที่ 3.27	(ก) โครงสร้าง Meta-materials รูปตัว S และ (ข) วงจรเสมือนของโครงสร้างรูปตัว S	74
ภาพที่ 3.28	โครงสร้าง และ วงจรเสมือนของโครงสร้าง Meta-materials รูปตัว Y	75

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ 3.29	(ก) โครงสร้าง Meta-materials และ (ข) วงจรเสมือนของโครงสร้าง	76
ภาพที่ 3.30	(ก) โครงสร้างของ C_n ที่ออกแบบและ (ข) วงจรรวมของโครงสร้างที่หาจากทฤษฎีการวิเคราะห์วงจรเมื่อ W คือความกว้างของแขน และ H1 คือแกน H2 คือแขนของแกน d คือระยะห่างระหว่าง 2 แผ่น	77
ภาพที่ 3.31	(ก) วงจร Purely Right-handed (PRH) (ข) วงจร Purely Left-handed (PLH) และวงจร Composite Right/Left-handed Lossless Transmission Lines	79
ภาพที่ 3.32	แผนภาพ Dispersion ของ 1) PRH TL 2) PLH TL และ 3) CRLH TL	80
ภาพที่ 3.33	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\omega - \beta$ กับวงจรเสมือนของ CRLH TL	81
ภาพที่ 3.34	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการหักเห n กับค่าความถี่ ω	83
ภาพที่ 3.35	วงจรเสมือนของสายส่งที่มีความเป็นเนื้อเดียว	83
ภาพที่ 3.36	โครงสร้างสายส่ง LH และ RH	84
ภาพที่ 3.37	ตัวอย่างโครงสร้าง Meta-materials ที่มีค่าดัชนีการหักเหเข้าสู่ศูนย์	86
ภาพที่ 3.38	วัตถุ (ก) ที่มีคุณสมบัติไครอลลิตี และ (ข) ไม่มีคุณสมบัติไครอลลิตี	87
ภาพที่ 3.39	คุณสมบัติของวัสดุประเภทไครอล	88
ภาพที่ 3.40	วิธีหาค่าดัชนีไครอลลิตีด้วยวิธีการวัดความต่อเนื่องของลักษณะสมมาตร	88
ภาพที่ 3.41	การเปลี่ยนแปลงมุม B ของโครงสร้างของ C_4	90
ภาพที่ 3.42	การเปรียบเทียบค่าดัชนีไครอลลิตีของโครงสร้าง C_3-C_8 (ก) วิธีการวัดความต่อเนื่องของลักษณะสมมาตร (Continuous Chirality Measures) และ (ข) วิธีแบ่งครึ่งมุมสมมาตร (Angular Bisection Methods)	90
ภาพที่ 3.43	การกำหนดจุดที่ใช้ในการคำนวณหาค่าไครอลลิตีด้วยวิธี (ก) วิธีการวัดความต่อเนื่องของลักษณะสมมาตร (Continuous Chirality Measures) และ (ข) วิธีแบ่งครึ่งมุมสมมาตร (Angular Bisection Methods)	91
ภาพที่ 3.44	(ก) โครงสร้าง Cross-wire (ข) ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน และ (ค) ค่าดัชนีหักเห และค่าไครอล ของคลื่น RCP และ LCP	92
ภาพที่ 3.45	(ก) โครงสร้าง Twisted-rosette (ข) ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน และ (ค) ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า ค่าความซึมซาบได้ทางแม่เหล็ก และค่าไครอล ของคลื่น RCP และ LCP	93
ภาพที่ 3.46	LF ของวัสดุ Achiral media เมื่อ $T = T_+ = T_- = 0.9e^{i\theta}$; $\theta = \theta_\pm$ มีค่าตั้งแต่ $-\pi$ ถึง π ; LF เป็นตัวแปรของ (ก) θ_r และ (ข) A_r	97

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ 3.47	LF ของคลื่น RCP ในวัสดุ Chiral เมื่อเป็นฟังก์ชั่นของเฟสของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ของคลื่น LCP เมื่อ (ก) $\theta_{-} = \pi$, (ข) $\theta_{-} = \pi/2$, (ค) $\theta_{-} = -\pi/2$ และ (ง) $\theta_{-} = -\pi$.	98
ภาพที่ 3.48	ขั้นตอนการหาค่า n, ε, μ และ κ	100
ภาพที่ 3.49	X-C-C-Y มุมสองหน้า หรือ Dihedral angle.	101
ภาพที่ 4.1	ส่วนประกอบหลักของการสื่อสารโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	107
ภาพที่ 4.2	ลักษณะการกระจายคลื่นแบบต่างๆ (ก) Directional Pattern (ข) Isotropic Patterns และ (ค) Omni Directional Pattern	108
ภาพที่ 4.3	Pattern Parameters ของสายอากาศ	108
ภาพที่ 4.4	Snell's Law	109
ภาพที่ 4.5	การเคลื่อนที่ของคลื่นผ่านวัสดุที่มีค่าดัชนีการหักเหเป็นศูนย์ จากการประมวลผลด้วยวิธี FDTD ที่ Time Step ที่ (a) 0 (b) 500 (c) 1000 และ (d) 8000 เมื่อคลื่นเคลื่อนที่จากด้านบนลงมาด้านล่างผ่านแถบวัสดุที่มีค่า n = 0	110
ภาพที่ 4.6	การเคลื่อนที่ของคลื่นผ่านวัสดุที่มีค่าดัชนีการหักเหเป็นศูนย์ เมื่อคลื่นเคลื่อนที่จากด้านซ้ายไปทางด้านขวา ผ่านวัสดุรูปทรงคล้ายเลนส์นูนที่มีค่า n = 0	111
ภาพที่ 4.7	(ก) ทิศทางของสนามไฟฟ้าแบบ 6 ทิศทาง ที่เคลื่อนที่ออกแบบวัสดุที่มีค่าดัชนีการหักเหเป็นศูนย์ และ (ข) ค่าสนามไฟฟ้าที่ระยะ Far-field ที่มุมต่างๆ	111
ภาพที่ 4.8	(ก) โครงสร้าง Fish Net และ (ข) ค่าดัชนีการหักเหในส่วนจริงและส่วนจินตภาพ	113
ภาพที่ 4.9	กรณีทั้ง 4 ของคลื่นที่มีโพลาไรเซชั่นแบบวงกลมที่แพร่กระจายภายวัสดุ Chiral เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าเป็นมุมกับวัสดุ	113
ภาพที่ 4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบและมุมส่งผ่านในวัสดุไครอล ที่มีค่าดัชนีการหักเห (ก) เป็นบวก และ (ข) เป็นลบ เมื่อ κ =0.25	115
ภาพที่ 4.11	โครงสร้างเกลียวสี่เส้นแบบ (ก) หมุนขวา หรือ right-handed และ (ข) หมุนซ้าย หรือ left-handed (ค) โครงสร้างเกลียวเส้นเดี่ยว หรือ Single Helix (ง) โครงสร้างเกลียวสามเส้น หรือ Triple Helix และ (จ) โครงสร้างเกลียวสี่เส้น หรือ Quadruple Helix	116
ภาพที่ 4.12	โครงสร้างเกลียวขนาดไมโครเมตร	116
ภาพที่ 4.13	โครงสร้างเกลียวสี่เส้นและผลตอบสนองทางแม่เหล็กไฟฟ้า	117

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ 4.14	โครงสร้างเกลียวห้าเส้นและผลตอบสนองทางแม่เหล็กไฟฟ้า	118
ภาพที่ 4.15	(ก) โครงสร้าง DNA ประเภทเกลียวคู่หรือ Double Helix (ข) โครงสร้าง Split Ring Resonator (SRR) (ค) โครงสร้างเกลียวเดี่ยว หรือ Single Helix และ (ง) โครงสร้าง DNA ที่แสดงขนาด 2.5nm (diameter) x 3.4nm (helix turn)	119
ภาพที่ 4.16	(ก) โครงสร้าง SRR และ (ข) ผลตอบสนองทางแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง	120
ภาพที่ 4.17	(ก) โครงสร้างเกลียว DNA แบบหมุนตามเข็มนาฬิกา (Right-handed) (ข) การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางแม่เหล็กไฟฟ้า จาก LCP และ RCP excitation (ค) โครงสร้างเกลียว DNA แบบหมุนทวนเข็มนาฬิกา (Left-handed) และ (ง) การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางแม่เหล็กไฟฟ้า จาก LCP และ RCP excitation	120
ภาพที่ 4.18	(ก) โครงสร้าง C8 แขนไม่เท่า เมื่อ A = 17.472 mm, B = 2.912 mm C = 14.976 mm และ θ = 30 degree (ข) Array ของโครงสร้าง C8 แขนไม่เท่า สร้างจากแผ่น Rogers RT 6010 ε_r = 10.2 ความหนา 0.254 mm ขนาดของแผ่น PCB คือ 17.6x17.6 mm ชั้นทองแดงมีความหนา 0.035 mm	121
ภาพที่ 4.19	สนามไฟฟ้าบนโครงสร้าง C8 แขนไม่เท่า เมื่อพิจารณาการ Excitation ด้วยคลื่นที่มีโพลาไรซ์แบบวงกลมประเภท (ก) หมุนซ้ายและ (ข) หมุนขวา	122
ภาพที่ 4.20	(ก) สายอากาศประเภทไมโครสติปประเภทโพลาไรซ์แบบวงกลม และ (ข) การวางโครงสร้างโพลาไรซ์ C8 แขนไม่เท่า บนสายอากาศไมโครสติป	123
ภาพที่ 4.21	ค่า Return Loss (ก) ก่อนและ (ข) หลังมีส่วนโครงสร้างโพลาไรซ์ C8 แขนไม่เท่า และค่าอัตราส่วน AR ของสายอากาศ (ค) ก่อนและ (ง) หลังมีส่วนโครงสร้างโพลาไรซ์ C8 แขนไม่เท่า	123
ภาพที่ 4.22	โครงสร้าง C8 แบบแขนสลับ เมื่อขนาดของ Unit Cell คือ 37mm x 37mm ความกว้างของเส้นโครงสร้างมีค่า $\mathbf{w}$ = 2.8 mm ความยาวของแกนหลัก $\mathbf{H}_1$ = 15.7 mm ความยาวของแขนรอง $\mathbf{H}_2$ = d/2 mm ค่ามุมระหว่างแขนหลัก B = 360 ^{o} /n ความหนาของเส้นโครงสร้าง $\mathbf{t}$ = 0.03 mm ความหนาของแผ่น Substrate $\mathbf{s}$ = 0.254 mm	124
ภาพที่ 4.23	ผลจากการประมวลผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และจากการวัดจริงของโครงสร้าง C8 แบบแขนสลับ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่น RCP และ LCP (ก) ขนาด (ข) เฟส (ค) ค่า Chirality และ (ง) ค่าดัชนีการหักเห	125
ภาพที่ 4.24	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	126

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ 4.25	ผลการจำลองเทียบกับผลวัด เมื่อ (ก) และ (ข) แอมพลิจูดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (ค) และ (ง) เฟสของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ของโครงสร้างเกลียวสายเดี่ยว 3 มิติแบบหลายชั้น	127
ภาพที่ 4.26	ผลการจำลองเทียบกับผลวัด เมื่อ การ (ง) และ (ค) ดัชนีหักเหและไครอล (ข) และ (ก) สูญเสีย ของโครงสร้างเกลียวสายเดี่ยว3 มิติแบบหลายชั้น	128
ภาพที่ 4.27	ผลการจำลองเทียบกับผลวัด เมื่อ (ก) และ (ข) แอมพลิจูดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (ค) และ (ง) เฟสของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ของโครงสร้างเกลียวสายคู่ 3 มิติแบบหลายชั้น	129
ภาพที่ 4.28	ผลการจำลองเทียบกับผลวัด เมื่อ (ก) และ (ข) ดัชนีหักเหและไครอล (ค) และ (ง) การสูญเสีย ของโครงสร้างเกลียวสายคู่ 3 มิติแบบหลายชั้น	129
ภาพที่ 4.29	ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่ผ่านวัสดุประเภทไครอล	130
ภาพที่ 4.30	ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่ผ่านวัสดุประเภทไครอลรูปทรง Wedge	131
ภาพที่ 4.31	คลื่นที่แยกเมื่อผ่านวัสดุประเภทไครอลรูปทรง Wedge	132
ภาพที่ 4.32	ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบและมุมที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านวัสดุที่ไม่ใช่ไครอลรูปทรง Wedge เมื่อมีค่าดัชนีการหักเหต่างๆ	133
ภาพที่ 4.33	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมวิกฤติของคลื่นโพลาไรซ์แบบวงกลมประเภทหมุนซ้ายหรือมุมขวา กับค่าพารามิเตอร์ไครอล (κ)	134
ภาพที่ 4.34	ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบและมุมส่งผ่านเมื่อค่าดัชนีการหักเหมีค่าต่างกัน เมื่อ (ก) K=0.25 และ (ข) K=1	135
ภาพที่ 4.35	(ก) การห่อหุ้มบางส่วน (ข) ปรากฏการณ์ภาพและการกระเจิงเมื่อวัตถุไดโพล (จุดสีดำ) อยู่ที่ตำแหน่ง $z_d = d/5$ ห่างจากหน้า Slab วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ (ระหว่างเส้นทึบ) เมื่อ (ก) และ (ข) เป็นผลมาจากเส้นโค้งสีดำ (ทึบ) และสีแดง (ปะ)	137
ภาพที่ 4.36	(ก) วัตถุไดโพลที่ถูกห่อหุ้มและ (ข) ถูกสร้างภาพด้วย Slab ประเภท Anisotropic “folded geometry”	137
ภาพที่ 5.1	Tapered Ridges ที่สร้างจากชั้นโลหะและฉนวน ที่มีความสามารถในการดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้นช่วงความถี่ต่างๆ ในระดับชั้นที่ต่างกัน เมื่อความยาวคลื่นสอดคล้องกับความกว้างของ Ridge	141

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ 5.2	ผลตอบสนองการดูดซับแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ กัน	142
ภาพที่ 5.3	การทดลองในห้องปฏิบัติการที่มหาวิทยาลัย Harvard แสดงการใช้ Femtosecond Lasers เพื่อใช้สร้าง Meta-materials	143
ภาพที่ 5.4	เทคนิคการสร้างด้วยเลเซอร์ ที่สามารถจัดเรียงอนุภาคเงินนาโน 3 มิติ ที่ไม่ต่อเนื่องด้วยเมตริกโพลิเมอร์ เทคนิคการสร้างโครงสร้าง Meta-materials แบบใหม่โดยคณะวิจัยจากมหาวิทยาลัย Harvard	143
ภาพที่ 5.5	(ก) โครงสร้าง Meta-materials ที่ม้วนเป็นวง เส้นทึบเป็นแผ่นของแข็งที่ถูกสอดใส่ในของไหล	144
ภาพที่ 5.6	สนามความดันของ (ก) ปริซึมเสียงที่สร้างจากโครงสร้าง Meta-materials ขนาดเล็ก (ข) ปริซึมเสียง ที่ถูกแสดงในรูปวัสดุประสิทธิผล	145
ภาพที่ 5.7	(ก) โครงสร้าง Meta-materials (ข) ค่าคงที่ไดอิเลคตริคประสิทธิผล (ส่วนจริง) ของโครงสร้าง (ค) ข้อมูล Time-resolved photoluminescence จาก QDs ที่สร้างบน Meta-materials ตัวอย่างควบคุม และแผ่น Substrate แก้ว ที่ความยาวคลื่น 605 nm 621 nm และ 635 nm (ง) Lifetime ของ QDs เป็น Function ของความยาวคลื่นของ Meta-material ตัวอย่างควบคุม และแผ่น Substrate แก้ว	146