

วัสดุเหนือธรรมชาติ Meta-Materials

นันทกานต์ วงศ์เกษม (Nantakan Wongkasem)^{1*}

กนิษฐ์ มาตรา (Khanit Matra)²

บทคัดย่อ

วัสดุเหนือธรรมชาติหรือวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ ถูกสร้างขึ้นจากโครงสร้างเรโซแนนซ์ที่จัดเรียงเป็นแถวลำดับแบบคาบ เนื่องจากคาบและขนาดที่ใหญ่ที่สุดของโครงสร้างมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นในช่วงที่ใช้งาน โครงสร้างสังเคราะห์ดังกล่าวจึงมีความเป็นเนื้อเดียว โดยเมื่อคาบของโครงสร้างแถวลำดับและความยาวคลื่นอยู่ในความสัมพันธ์ที่เหมาะสม คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและวัสดุโครงสร้างจะเกิดปฏิสัมพันธ์ที่ทั้งเสริมและหักล้างกัน ทำให้วัสดุเกิดพฤติกรรมแถบช่องว่างทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยปฏิสัมพันธ์ทั้งสองสามารถใช้เพื่อกำหนดค่าสภาพยอมและค่าความซาบซึ่มประสิทธิผลของวัสดุให้อยู่ในช่วงที่โดยปกติไม่สามารถทำได้ง่ายหรืออาจเป็นค่าที่ไม่มีอยู่ในวัสดุธรรมชาติได้ วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากหลาย นับตั้งแต่เรโซเนเตอร์จนถึงสายอากาศที่สามารถควบคุมทิศทางได้อย่างยอดเยี่ยม เช่น การพิมพ์นาโนด้วยแสง วงจรไฟฟ้านาโน ตัวเคลือบเหนือธรรมชาติ รวมถึง วัสดุล่องหน

บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับวัสดุเหนือธรรมชาติ โดยอธิบายถึงหลักการซึ่งครอบคลุม ประวัติวิธีการสังเคราะห์และการออกแบบ ประเภท และคุณสมบัติพิเศษของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ทางด้านฟิสิกส์และแม่เหล็กไฟฟ้า และมีการพิจารณาถึงการประยุกต์ใช้และกล่าวถึงวัสดุเหนือธรรมชาติในทศวรรษนี้อีกด้วย

Abstract

Meta-materials or artificial electromagnetic materials are composed of periodic arrays of resonant structures that can be realized as a bulk medium when the structure period and the largest dimensions of the inclusions are much smaller than the wavelength. When the period is an appreciable amount of the wavelength, constructive and destructive interferences occur leading to electromagnetic bandgap behavior. In both cases, the effective permittivity and permeability can be tuned to values not easily achievable in natural materials. Meta-materials hold significant promise for the future, ranging from applications in sub-wavelength resonators to super-directive antennas such as in optical nanolithography, nano circuits and meta-coating, including also the famous cloaking phenomenon which can make objects invisible.

¹อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

²นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

*corresponding author, e-mail : nantakan@kku.ac.th

This paper provides an introduction to meta-materials describing the principle: history, basic synthesis and modeling techniques, types and their special physical and electromagnetic properties. Applications of these “beyond” materials and the potential of meta-materials in this century are also discussed.

คำสำคัญ: วัสดุเหนือธรรมชาติ, วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์, ดัชนีหักเหของแสงติดลบ, วัตถุล่องหน

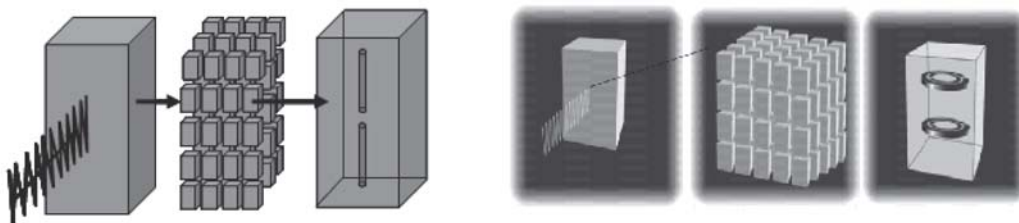
Keywords: Meta-materials, Artificial electromagnetics, Negative refractive index, Invisible objects,

บทนำ

วัสดุกระทำและมีปฏิกิริยากับแสงและสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งการควบคุมแสงสามารถทำได้หลายวิธี โดยเฉพาะจากตัวแปรที่สำคัญนั่นก็คือวัสดุที่เหมาะสม การส่งและรับข้อมูลโดยแสงเกิดจากโครงสร้างภายในของวัสดุ ขั้นตอนดังกล่าวเป็นการบรรจุข้อมูลที่มีมวลเป็นศูนย์กลางในสัญญาณที่มีความเร็วที่ไม่สอดคล้องกัน โดยปกติแสงจะมีพฤติกรรม “ด้านมือเดียว” หรือ One-Handed นั่นคือเมื่อแสงมีการกระทำกับอะตอมของวัสดุตามธรรมชาติทั่วไป จะมีเพียงสนามไฟฟ้า (Electric Field) ที่มีผลกับอะตอมของวัสดุนั้น ในขณะที่สนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) จะมีผลน้อยมากจนเกือบจะไม่มีเลยเนื่องจากโดยปกติสนามแม่เหล็กจะมีค่าอ่อน

วัสดุเหนือธรรมชาติ หรือ Meta-materials เป็นวัสดุสังเคราะห์ที่ถูกออกแบบอย่างเหมาะสมเพื่อให้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กกระทำร่วมกับอะตอมเหนือธรรมชาติ (Meta-Atoms) ได้ในบทความนี้จะวิจารณ์วัสดุเหนือธรรมชาติโดยเน้นคุณสมบัติด้านแม่เหล็กไฟฟ้า จึงจะกล่าวถึงวัสดุประเภทนี้ในอีกข้อหนึ่งด้วยคือ วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้า

สังเคราะห์ หรือ Artificial Electromagnetic Metamaterials โครงสร้างที่ประกอบเป็นวัสดุประเภทนี้จะถูกจัดเรียงเป็นลักษณะโครงสร้างคาบ หรือ Periodic Inclusions และขนาดของโครงสร้างจะมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นที่ใช้ในช่วงทำงาน (Operating Wavelength) เพื่อที่วัสดุจะสามารถแสดงคุณสมบัติความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous Property) ส่วนโครงสร้างคาบ จะประพฤติตัวเป็นโมเลกุลสังเคราะห์ (Artificial Molecule) ที่จะมีปฏิกิริยากระทำร่วมกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 1 วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ที่ได้ถูกออกแบบโครงสร้างอย่างเหมาะสม จะสามารถทำให้ตัวประกอบของทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเชื่อมรวมกับเมทาอะตอม (Meta-Atoms) จากปกติที่วัสดุในธรรมชาติจะมีเฉพาะตัวประกอบของสนามไฟฟ้าที่สามารถปฏิสัมพันธ์กับอะตอมของวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพทำให้เกิดคุณสมบัติใหม่ทางด้านแสง เช่น แสงสองด้านมือ (“Two-Handed” Light) และ ดัชนีหักเหของแสงที่มีค่าติดลบ (Negative Refractive Index) เป็นต้น

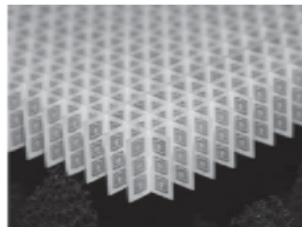


รูปที่ 1. โครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ที่กระทำและมีปฏิกิริยากับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

คำว่า “Meta” ในภาษากรีกหมายความว่า “เหนือ” จึงอาจกล่าวได้ว่า Meta-materials คือวัสดุที่มีคุณสมบัติเหนือวัสดุพื้นฐานทั่วไป หรือเป็น “วัสดุเหนือธรรมชาติ” วัสดุเหนือธรรมชาติถูกสร้างโดยมนุษย์ เพื่อกำหนดและควบคุมคุณสมบัติที่ไม่มีในวัสดุตามธรรมชาติ ทำให้เกิดปรากฏการณ์ใหม่ นำพาไปสู่การประยุกต์ใช้ทางแสงที่สำคัญที่ถูกคาดการณ์ว่าจะเป็นประตูสู่วิทยาการวัสดุศาสตร์ในอนาคต หนึ่งในคุณสมบัติมหัศจรรย์ของวัสดุเหนือธรรมชาติคือ ค่าดัชนีการหักเหของแสงที่ติดลบ

อาจจะกล่าวได้ว่าการศึกษา Meta-materials เริ่มมีตั้งแต่ปี ค.ศ. 1904 โดย Sir Arthur Schuster และ H. Lamb ซึ่งได้ศึกษาความเร็วเฟสที่ติดลบ (Negative Phase Velocity) (Schuster, Lamb, 1904) หลังจากนั้นในปี ค.ศ. 1968 V. G. Veselago (Veselago, 1968) นักวิทยาศาสตร์ชาวรัสเซีย ได้ศึกษาคุณสมบัติแสงของวัสดุที่มีดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบ (Negative Refractive Index, $(-n)$) และเนื่องจากวัสดุนั้นๆ มีค่าสภาพยอม หรือ Permittivity (ϵ) และ ค่าความซาบซึมได้ หรือ Permeability (μ) ติดลบ (Veselago, 1968) ซึ่งไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในวัสดุตามธรรมชาติใดๆ วัสดุดังกล่าวจึงถูกจัดเป็นวัสดุสังเคราะห์ทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า Veselago ได้แสดงปรากฏการณ์ทางแสงต่างๆ ที่สามารถเกิดขึ้นได้ในวัสดุดังกล่าวแต่นั้นก็เป็นเพียงการคำนวณและแสดงผลทางทฤษฎีเท่านั้น จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1996 ศาสตราจารย์ Sir John Pendry และคณะ จากวิทยาลัย Imperial ประเทศอังกฤษ ได้เสนอโครงสร้างของวัสดุที่มีค่าสภาพยอม และความซาบซึมได้ติดลบ (โครงสร้าง

Spilt Ring Resonator (SRR) สำหรับวัสดุที่มี $(-\mu)$ และ โครงสร้าง Array of Wires สำหรับวัสดุที่มี $(-\epsilon)$ (Pendry et al., 1996) อย่างไรก็ตามการศึกษาและพัฒนาวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ (Electromagnetic Meta-materials) เริ่มมีขึ้นอย่างจริงจัง เมื่อวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ ประเภทดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบ ได้ถูกสร้างขึ้นจริงโดยกลุ่มของศาสตราจารย์ D. R. Smith จากมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนียแห่งซานดิเอโก (UCSD) ในปี ค.ศ. 2000 รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างโครงสร้าง Meta-materials ในยุคเริ่มต้น ประกอบด้วยโครงสร้าง Wire และ Spilt Ring Resonators (Smith et al., 2000) ที่มีค่าดัชนีการหักเหเป็นลบ และ โครงสร้างที่ใช้เพื่อออกแบบวัสดุล่องหน (Schurig et al., 2006) วัสดุที่มีค่าดัชนีการหักเหติดลบ สามารถนำไปประยุกต์ใช้สร้างซูเปอร์เลนส์ ที่สามารถเห็นและจับภาพวัตถุหรือโครงสร้างที่มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นของแสงที่กระทำกับวัตถุหรือโครงสร้างดังกล่าว ซึ่งสามารถนำไปใช้ร่วมกับสายอากาศคุณสมบัติสูงต่างๆ รวมถึงอุปกรณ์ Optical Nanolithography, Nano Circuits, และ Meta-coating ที่ใช้สร้างวัสดุล่องหน รูปที่ 3 แสดงการเคลื่อนที่ของแสงเมื่อผ่านวัสดุที่มีค่าดัชนีหักเหที่มีค่าติดลบ (Wongkasem et al., 2006) และเมื่อเคลื่อนที่ผ่านวัสดุล่องหน (Chen et al., 2007) หรือ “Invisible Objects” จากคุณสมบัติพิเศษที่ไม่มีในวัสดุใดๆ ในธรรมชาติและความเป็นไปได้ที่สามารถนำ Meta-materials ไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ ได้หลากหลาย ในปี ค.ศ. 2003 วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ ถูกจัดเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ค้นพบแห่งปีจากนิตยสาร Science

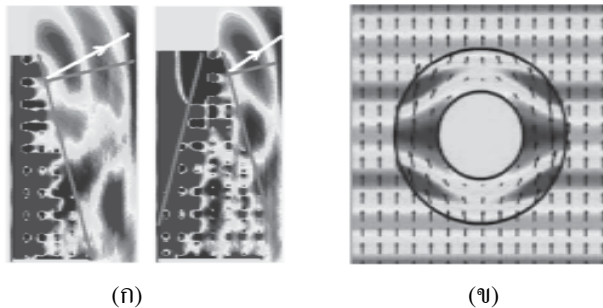


(ก)



(ข)

รูปที่ 2. ตัวอย่าง (ก) โครงสร้าง Metamaterials ในยุคเริ่มต้นในปี ค.ศ. 2001 แสดงโครงสร้าง Wire และ Spilt Ring Resonators (ที่มา: Smith et al., 2000) และ (ข) ในปี ค.ศ. 2007 โครงสร้างที่ใช้เพื่อออกแบบวัสดุล่องหน (ที่มา: Schurig et al., 2006)



รูปที่ 3. ภาพแสดงการเคลื่อนที่ของแสงเมื่อผ่าน (ก) วัสดุที่มีค่าดัชนีหักเหที่มีค่าติดลบ (ที่มา: Wongkasem et al., 2006) และ (ข) วัสดุล่องหน (ที่มา: Chen et al., 2007)

หลักการและประเภทของวัสดุเหนือธรรมชาติ

วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงซ้อน (Complex Electromagnetic Materials)

วัสดุประเภท Bi-anisotropic เป็นวัสดุหลักทางแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบด้วย Tensor 4 ตัว คือ $\underline{\underline{\epsilon}}$, $\underline{\underline{\zeta}}$, $\underline{\underline{\zeta}}$ และ $\underline{\underline{\mu}}$ โดย Tensor 4 ตัว ถูกใช้อธิบายคุณสมบัติทางไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้าได้จากสมการที่ (1)

$$\begin{bmatrix} \underline{D} \\ \underline{B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\underline{\epsilon}} & \underline{\underline{\zeta}} \\ \underline{\underline{\zeta}} & \underline{\underline{\mu}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{E} \\ \underline{H} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$\underline{\underline{\epsilon}}$ และ $\underline{\underline{\mu}}$ คือ เฟคเตอร์ (Factor) ของ Permittivity และ Permeability ตามลำดับ โดยทั้งสอง Factor อาจถูกเรียกรวมกันว่า Co-polarization Tensors ในขณะที่ Cross-polarization Tensors, $\underline{\underline{\zeta}}$ และ $\underline{\underline{\zeta}}$ เป็น Factor ที่บ่งชี้ Magnetolectric Coupling ซึ่ง Tensor ทั้ง 4 ตัวจะมีค่าอยู่ในทั้ง 3 แกนได้แก่ แกน x, แกน y และ แกน z ดังนั้น Tensor 1 ตัวจะเป็นเมตริกซ์ (Matrix) ขนาด 3x3 สมการที่ (2) แสดงตัวประกอบของ Tensor ทั้ง 4 ตัว

$$\underline{\underline{\epsilon}} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{bmatrix} = \underline{\underline{\mu}} = \begin{bmatrix} \mu_{xx} & \mu_{xy} & \mu_{xz} \\ \mu_{yx} & \mu_{yy} & \mu_{yz} \\ \mu_{zx} & \mu_{zy} & \mu_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\underline{\underline{\zeta}} = \begin{bmatrix} \zeta_{xx} & \zeta_{xy} & \zeta_{xz} \\ \zeta_{yx} & \zeta_{yy} & \zeta_{yz} \\ \zeta_{zx} & \zeta_{zy} & \zeta_{zz} \end{bmatrix} = \underline{\underline{\zeta}} = \begin{bmatrix} \zeta_{xx} & \zeta_{xy} & \zeta_{xz} \\ \zeta_{yx} & \zeta_{yy} & \zeta_{yz} \\ \zeta_{zx} & \zeta_{zy} & \zeta_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

จากสมการที่ 2 จะเห็นว่าวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีค่าตัวประกอบทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Components) ทั้งหมด 36 ตัว ที่สามารถใช้เป็นตัวแบ่งประเภทวัสดุย่อยลงไปได้อีกตามค่าของ $\underline{\underline{\epsilon}}$, $\underline{\underline{\zeta}}$, $\underline{\underline{\zeta}}$ และ $\underline{\underline{\mu}}$ โดยถ้าไม่มี Cross-polarization Tensors ($\underline{\underline{\zeta}}$ และ $\underline{\underline{\zeta}}$) วัสดุจะอยู่ในกลุ่ม Anisotropic ส่วนในกรณีของ Bi-isotropic ปริมาณ Tensor ทั้ง 4 จะเปลี่ยนเป็นค่าสเกลาร์ (Scalar) ซึ่งไม่มีความเกี่ยวข้องกับทิศทาง และ วัสดุ Isotropic จะมีเฉพาะค่าสเกลาร์ของ Permittivity และ Permeability เท่านั้น ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงซ้อน โดยวัสดุทั้ง 4 ประเภทนี้ ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ กันไป ตามเงื่อนไขของผลลัพธ์และความต้องการ ดังนั้นถ้าจัดประเภทของโครงสร้างวัสดุที่บ่งชี้ตัวประกอบทางแม่เหล็กไฟฟ้าในได้ จะช่วยให้การออกแบบวัสดุสังเคราะห์แม่เหล็กไฟฟ้าลดความซับซ้อนลง (Wongkasem et al., 2006)

ตารางที่ 1. คุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงซ้อน นอกจากค่า Co- และ Cross-polarization

Isotropic Medium ϵ, μ	Bi-isotropic Medium $\epsilon, \mu, \zeta, \zeta$
Anisotropic Medium $\underline{\underline{\epsilon}}, \underline{\underline{\mu}}$	Bi-anisotropic Medium $\underline{\underline{\epsilon}}, \underline{\underline{\mu}}, \underline{\underline{\zeta}}, \underline{\underline{\zeta}}$

Tensors ทั้ง 4 ที่ถูกเอามาใช้ในการจัดประเภทวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงซ้อนแล้ว การวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้แก่ Chirality, Reciprocal และ Symmetry ของโครงสร้างจะช่วยให้จัดประเภทของวัสดุได้ย่อยลงไปอีก โดยวัสดุที่ไม่มีค่า Chirality

จะเป็นวัสดุประเภท Simple Isotropic หรือ Tellegen ซึ่งขึ้นอยู่กับว่า วัสดุนั้นมีคุณสมบัติ Reciprocal หรือไม่ ในขณะที่วัสดุที่มีค่า Chirality จะเป็นวัสดุประเภท Pasteur หรือ General Bi-isotropic ตารางที่ 2 แสดงการจัดประเภทของวัสดุ Bi-isotropic จากการมีค่า Chiral และ Reciprocal ของวัสดุ

ตารางที่ 2. ประเภทของวัสดุ Bi-isotropic (ที่มา: Lindell et al., 1994)

	ACHIRAL = ($\kappa = 0$)	CHIRAL = ($\kappa \neq 0$)
reciprocal = ($\chi = 0$)	simple isotropic medium	Pasteur medium
nonreciprocal = ($\chi \neq 0$)	Tellegen medium	general bi-isotropic medium

อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะเป็นการวิเคราะห์โครงสร้างขนาดมิลลิเมตรเพื่อใช้งานวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ในช่วงความถี่ไมโครเวฟ (ประมาณ 10^9 Hz) หรือขนาดนาโนเมตรในอุปกรณ์ที่มีช่วงความถี่ที่สูงขึ้นในช่วง Terahertz (10^{12} Hz) การวิเคราะห์โหมดของแม่เหล็กไฟฟ้า และ ตัวประกอบของแม่เหล็ก ซึ่งเป็นจำนวนเชิงซ้อน (Complex Number) ทั้งหมด 36 ตัวของวัสดุแม่เหล็กสังเคราะห์จะซับซ้อนและยุ่งยากทำให้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของ Meta-materials ส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาเป็นชิ้นงานเดียว หรือ โครงสร้างเดี่ยว โดยการวิเคราะห์จากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กโดยตรง เช่น โครงสร้าง Split Ring Resonator, โครงสร้าง Omega และ โครงสร้าง Gammadion โดย Marques et al. (2003), Saadoun et al. (1994) และ Papakostas et al. (2003) ตามลำดับ การนำเอาทฤษฎีกลุ่ม และทฤษฎีตำแหน่งกลุ่มซึ่งใช้ในวิทยาศาสตร์เคมีเพื่อการวิเคราะห์โครงสร้างของอะตอม และพันธะในโมเลกุล อาจสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาและคำนวณหาองค์ประกอบทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุสังเคราะห์แม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย โหมดของแม่เหล็กไฟฟ้า

(Electromagnetic (EM) Modes) และตัวประกอบของแม่เหล็ก (Magnetic Components) (Wongkasem et al., 2006)

ประเภทของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์

จากคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าและฟิสิกส์ของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ เราอาจแบ่งวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ออกเป็นประเภทต่างๆ ได้ดังนี้

1. Negative Index Meta-materials (Double Negative)

(Permittivity (ϵ) และ Permeability (μ) มีค่าน้อยกว่าศูนย์)

2. Single Negative Meta-materials

(Permittivity หรือ Permeability มีค่าน้อยกว่าศูนย์)

3. Chiral Meta-materials

(มี Cross Polarization Terms (ζ, ξ))

เมื่อ Permittivity คือ ค่าสภาพยอม เป็นตัวบ่งว่าสนามไฟฟ้าและวัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric Medium) มีผลกับต่อกันและกันอย่างไร Permeability คือ ความซาบซึมได้ เป็นตัวชี้ความตอบสนองทางแม่เหล็กเมื่อมีการใส่สนามแม่เหล็กเข้ามาในวัสดุ และ Cross

Polarization คือ โพลาริเซชันไขว้ ที่มีตัวประกอบของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าตั้งฉากกับตัวประกอบโพลาริเซชันที่ต้องการ

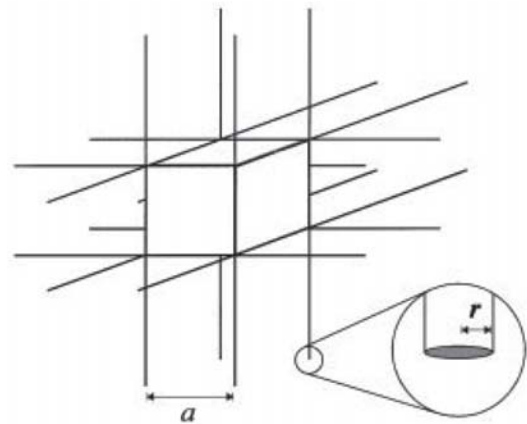
หลักการและการออกแบบวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์

การออกแบบโครงสร้างวัสดุให้มีคุณสมบัติที่ค่า Permeability และ Permittivity เป็นลบ ($\mu < 0$ และ $\epsilon < 0$) ใช้หลักการการเกิดของพลาสมอน (Plasmon) หรือกลุ่มของอิเล็กตรอนที่เกิดการ Oscillate จากการกระตุ้นโลหะที่มีความถี่สูงๆ ในย่าน Visible ใกล้กับช่วง Ultraviolet (UV) ซึ่งมีความถี่อยู่ในช่วง 10^{15} Hz โดยความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้กระตุ้นนั้นจะต้องต่ำกว่าความถี่พลาสมา (ω_p) ของโลหะนั้นจึงจะทำให้โครงสร้างที่สร้างจากโลหะดังกล่าวมีค่า Permittivity เป็นลบ ดังสมการที่ (3)

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega+i\gamma)} \quad (3)$$

เมื่อ ω_p คือความถี่พลาสมา โดยปกติแล้วจะอยู่ในช่วงสเปกตรัมของความถี่ในช่วง Ultraviolet, ω คือความถี่ของคลื่นที่สนใจ, γ คือเทอมของการหน่วงหรือ Damping ที่ใช้ในการอธิบายถึงการแพร่กระจายของพลังงาน Plasmon เข้าไปในระบบ

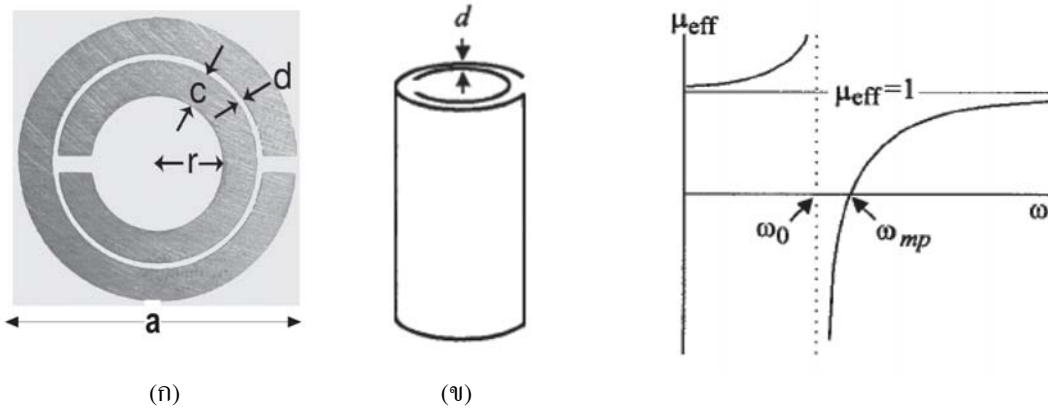
จากหลักการดังกล่าวได้มีการทดลองสร้างเส้นลวดทองแดง (Copper Wire) โดยออกแบบโครงสร้างให้มีลักษณะที่เป็นแบบโครงสร้างคาบ (Periodic Structure) ด้วยการจัดเรียงตัวของเส้นลวดทองแดงที่มีความยาวเป็นอนันต์ให้อยู่ในรูปร่างทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4. โครงสร้างคาบจากการจัดเรียงตัวของเส้นลวดทองแดง (Copper Wire) ที่มีความยาวเป็นอนันต์ให้อยู่ในรูปร่างทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (ที่มา: Pendry, 1996)

ผลการทดลองแสดงว่าโลหะจะมีคุณสมบัติที่ Permittivity เป็นลบ อยู่ในช่วงความถี่ที่เหนือความถี่พลาสมา (ω_p) เท่านั้น กลุ่มคณะวิจัยดังกล่าวยังได้เสนอว่าโครงสร้างที่สร้างด้วยวัสดุประเภทตัวนำที่ไม่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็ก (Nonmagnetic Conductor) จะแสดงค่า Effective Magnetic Permeability (μ_{eff}) และสามารถที่จะทำการปรับค่าได้โดยการปรับเปลี่ยนโครงสร้าง และได้ทำการทดลองสร้างโครงสร้างให้มีลักษณะที่เป็นแบบโครงสร้างคาบเช่นเดียวกัน โดยใช้โครงสร้าง Split Ring Resonator (SRR) ซึ่งจากการทดลองพบว่า SRR นั้นมีคุณสมบัติที่ทำให้ค่า Permeability เป็นลบ (รูปที่ 5) ดังสมการที่ (7) โดยการสร้างนั้นมีเงื่อนไขว่าจะต้องสร้างให้โครงสร้าง SRR มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นที่ใช้ในการทดลองมากๆ โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโครงสร้าง SRR จะต้องสอดคล้องกับสมการที่ (6) รูปที่ 5 แสดงโครงสร้าง 2 และ 3 มิติของ Split Ring Resonator

$$a \ll \lambda = 2\pi c_0 \omega^{-1} \quad (6)$$



รูปที่ 5. Split Ring Resonator ((ก) 2 และ (ข) 3 มิติ) เมื่อ a คือเส้นผ่านศูนย์กลางของ Unit Cell, c คือ ความหนาของแผ่น Nonmagnetic Conductor และ d คือ ระยะห่างระหว่างแผ่น Conductor (ที่มา: Pendry, 1999)

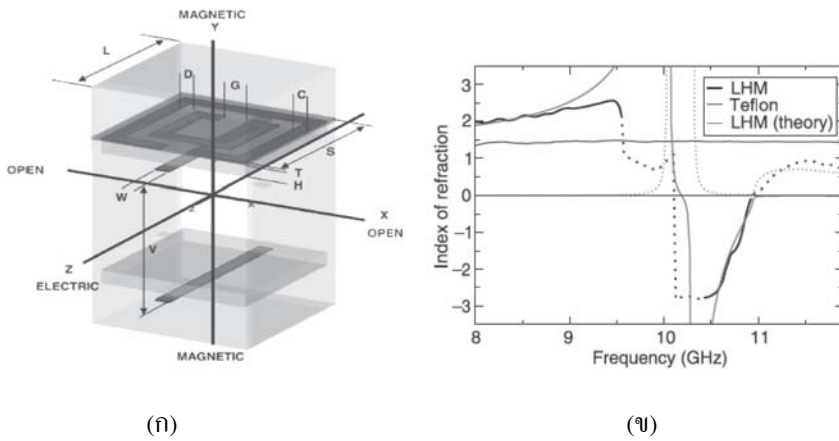
สมการที่ (7) แสดงค่า Effective Magnetic Permeability ของโครงสร้าง SRR

$$\mu_{eff} = 1 - \frac{\frac{\pi r^2}{a^2}}{1 + \frac{i2\sigma}{\omega\gamma\mu_0} - \frac{3dc_0^2}{\pi^2\omega^2 r^3}} \quad (7)$$

ค่า Effective Magnetic Permeability ของโครงสร้าง SRR ซึ่งถูกควบคุมโดยการเรโซแนนซ์ (Resonance) ของตัวเก็บประจุ (Capacitance) ที่เกิดระหว่างแผ่นของ SRR และตัวเหนี่ยวนำ (Inductance) ที่เกิดในโครงสร้าง แสดงในรูปที่ 6

รูปที่ 6. ค่า Effective Magnetic Permeability ของโครงสร้าง SRR ซึ่งถูกควบคุมโดยค่าเรโซแนนซ์ (Resonance) ของตัวเก็บประจุ (Capacitance) ที่เกิดระหว่างแผ่นของ SRR และตัวเหนี่ยวนำ (Inductance) ที่เกิดในโครงสร้าง

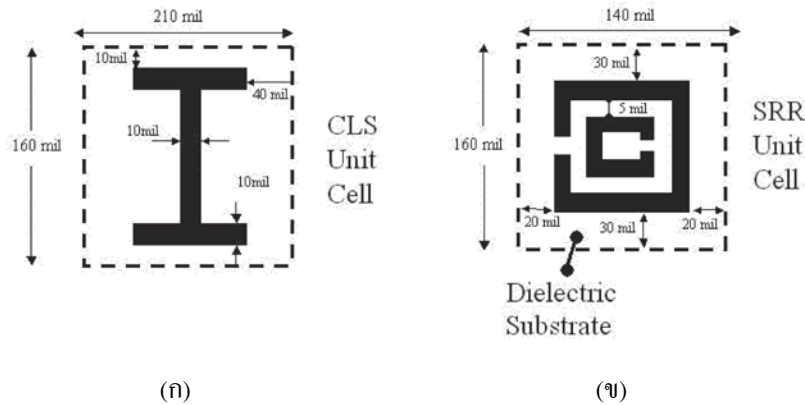
Meta-materials ถูกสร้างขึ้นมาจริง ในปี ค.ศ. 2000 (Smith et al., 2000) โดยได้ มาทำการสร้างและประกอบโครงสร้าง SRR และ Copper Wire ที่ได้มาจากหลักการของ Pendry Meta-materials มีโครงสร้างเป็นคาบ จากการทดลอง พบว่ามีช่วงผ่านหรือ Pass Band อยู่ในช่วงที่ Permeability และ Permittivity เป็นลบพร้อมกัน โดย Pass Band นี้คือช่วงที่วัสดุมีค่าดัชนีการหักเหของแสงติดลบ รูปที่ 7 แสดงโครงสร้างของ Meta-materials ที่ประกอบด้วยโครงสร้าง Copper Wire และ SRR ที่แสดงทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก และผลการวัดค่าดัชนีการหักเหโดยเปรียบเทียบ วัสดุ 3 ประเภท



รูปที่ 7. (ก) การสร้าง Meta-materials โดยทำการรวมโครงสร้าง SRR และ Copper Wire และ (ข) กราฟแสดงผลการวัดค่าดัชนีการหักเหของแสงที่เปรียบเทียบระหว่าง Meta-materials จริงที่ออกแบบให้มีค่าดัชนีการหักเหของแสงติดลบ, Teflon และ Meta-materials ในทางทฤษฎี (ที่มา: Shelby, 2001)

มีกลุ่มนักวิจัยหลายกลุ่ม ได้สร้าง Meta-materials ที่มีรูปร่างต่างๆ กัน ตามหลักการของ Pendry เช่น ในปี 2003 Richard W. Ziolkowski จากมหาวิทยาลัย Arizona ได้สร้างโครงสร้างโดยการประกอบกันของ

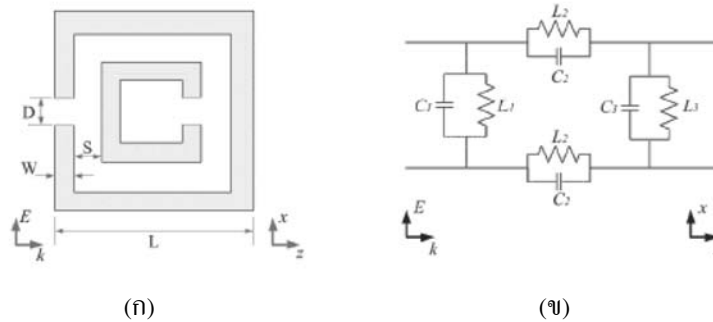
Capacitively Loaded Strips (CLSs) และ Split Ring Resonators ที่มีรูปสี่เหลี่ยม (Ziolkowski, 2003) ดังแสดงในรูปที่ 8 โดย CLSs นั้นจะทำให้เกิด ϵ ที่เป็นลบ และ Square SRRs จะให้ค่า μ ที่เป็นลบ



รูปที่ 8. โครงสร้าง (ก) Capacitively Loaded Strips (CLSs)และ (ข) Square Split Ring Resonators (SRRs) (ที่มา: Ziolkowski, 2003)

การวิเคราะห์ห้วงจรถูกนำมาใช้ช่วยในการวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กสังเคราะห์ด้วยเช่นกัน ดังงานของกลุ่มวิจัยจาก National University

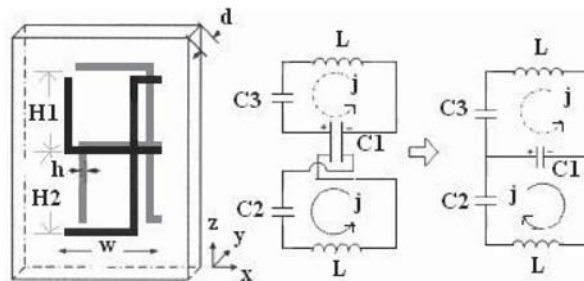
of Singapore โดย Q. Xu และคณะ (Xu et al., 2006) ที่ศึกษาโครงสร้าง SRR และวงจรไฟฟ้าของโครงสร้าง SRR ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9. (ก) โครงสร้างและ (ข) วงจรไฟฟ้าของ SRR (ที่มา: Xu et al., 2006)

นอกจากนี้การวิเคราะห์วงจร (Circuit Analysis) ยังสามารถนำมาใช้ช่วยในการออกแบบรูปทรงของโครงสร้าง เช่น การคำนวณหาค่า Resonance ของวงจร RLC จากโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้า

สังเคราะห์ในส่วนที่ต้องการออกแบบให้มี $(-\mu)$ จะช่วยให้เราสามารถคาดการณ์ตำแหน่งที่โครงสร้างนั้นจะมีค่าดัชนีหักเหของแสงที่มีค่าติดลบที่เกิดจากการคาบเกี่ยวหรือ Overlap ของ $(-\epsilon)$ และ $(-\mu)$ ได้



รูปที่ 10. ตัวอย่างการวิเคราะห์วงจรของโครงสร้าง Y (ที่มา: Wongkasem et al., 2007)

รูปที่ 10 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์วงจรของโครงสร้าง Y เพื่อคำนวณหาค่า Resonance ของโครงสร้าง ซึ่งค่า Resonance เป็นตัวแปรสำคัญตัวหนึ่งที่ใช้ช่วยในการออกแบบช่วงความถี่ที่เราต้องการของโครงสร้าง Meta-materials นั้นๆ ให้มีค่าดัชนีการหักเหมีค่าเป็นลบ

นอกจากนี้ยังมีการนำเอาทฤษฎีกลุ่ม หรือ Group Theory และทฤษฎีตำแหน่งกลุ่ม (Point Group Theory) มาใช้ช่วยในการออกแบบ (Wongkasem et al., 2007) ปกติทฤษฎีกลุ่มและทฤษฎีตำแหน่งกลุ่ม จะถูกใช้ในการวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบสมมูล (Symmetry Components) ของอะตอมในโมเลกุล เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างสังเคราะห์ก็จะสามารถช่วยในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแม่เหล็ก เช่น โหมดของ

แม่เหล็กไฟฟ้าและตัวประกอบของแม่เหล็กได้ในขั้นแรกวัสดุสังเคราะห์จะถูกจัดกลุ่มตามลักษณะการวางตัวของโครงสร้างทางเรขาคณิต (Geometry Structure) ของกลุ่มที่มีในทฤษฎีกลุ่ม และกลุ่มต่างๆ จะถูกจัดประเภทโดยใช้ค่าของตัวประกอบของแม่เหล็กเชิงซ้อนทั้ง 36 ตัว ที่ได้จากตัวประกอบสมมูลโดยผ่านขั้นตอนการวิเคราะห์การจัดตำแหน่งของโครงสร้าง การตรวจสอบความสมมูลก่อนและหลังการจัดใส่สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในทิศทางต่างๆ

ในการสร้าง Meta-materials นั้นสามารถที่จะสร้างและทดสอบโดยอุปกรณ์ทางวิศวกรรม Microwave โดยมีหลายวิธีในการสร้างเช่น Etching, Shadow Mask/Etching, Electron-Beam, Photolithography เป็นต้น ซึ่งในการสร้างนั้นจะต้องทำในห้อง Clean Room

โดยสามารถที่จะสร้างได้ในหลายๆช่วงความถี่ ซึ่งในปัจจุบันนี้กำลังได้รับความสนใจที่จะสร้างในย่านความถี่แสง (Optical Regime) ระหว่างย่าน Infrared (10^{12} GHz) ถึง Ultra violet (10^{16} Hz) หรือในขนาดความยาวคลื่นตั้งแต่ 10^6 เมตร (ประมาณขนาดของแบคทีเรีย) เข้าสู่ 10^8 เมตร (ประมาณขนาดของโปรตีน) แต่ว่าการสร้าง Meta-materials ในระดับนี้จะมี ความยากขึ้นมากเนื่องจากจะต้องสร้างให้มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นในย่านความถี่สูง ดังนั้นขนาดของโครงสร้างจะเล็กมากและราคาในการสร้าง โครงสร้างที่มีขนาดเล็กมากๆ จะมีราคาแพงมาก

วัสดุเหนือธรรมชาติกับคุณลักษณะพิเศษทางฟิสิกส์และไฟฟ้า

การเคลื่อนที่ของคลื่นในวัสดุที่มี Permeability และ Permittivity เป็นลบ ($m < 0$ และ $e < 0$ (Left-Handed))

จากความสัมพันธ์ของ Maxwell Equation และกฎการอนุรักษ์สามารถอธิบายได้จากสมการที่ (8)

$$\text{curl}E = -\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t} \quad (8.1)$$

$$\text{curl}H = \frac{1}{c} \frac{\partial D}{\partial t} \quad (8.2)$$

$$B = \mu H$$

$$D = \epsilon E$$

ในระนาบคลื่นที่มีความถี่เดียวกันจะมีความสัมพันธ์ อยู่ในรูปอัตราส่วนของ $e^{i(kz-\omega t)}$ เราสามารถลดรูปสมการที่ (8) ได้เป็น

$$k \times E = \frac{\omega}{c} \mu H \quad (9)$$

$$k \times H = -\frac{\omega}{c} \epsilon E$$

จากสมการที่ (9) ถ้า $\mu > 0$ และ $\epsilon > 0$ แล้ว E, H และ k จะเป็น Right-Handed (วัสดุทั่วไปที่พบตามธรรมชาติ) และถ้า $\mu < 0$ และ $\epsilon < 0$ จะเรียกว่า Left-Handed (วัสดุที่มีคุณสมบัติที่มี Permeability และ Permittivity น้อยกว่าศูนย์) และในเวลาเดียวกัน Pointing's Vector S จะหาได้ดังสมการที่ (10)

$$S = E \times H \quad (10)$$

สมการที่(10) นั้นหาได้จากการครอสเวกเตอร์ E และ H ทิศทางของ Wave Vector (k) นั้นจะมีทิศทางการเคลื่อนที่ไปในทิศเดียวกันกับกับ Phase Velocity (V^{ph}) ดังนั้น ถ้าวัสดุมีค่า Permeability และ Permittivity มีค่าเป็นลบ เวกเตอร์ V^{ph} และ Pointing's Vector S (ทิศทางของการไหลของพลังงาน) จะมีทิศทางตรงกันข้าม ซึ่งเรียกกรณีนี้ว่า Negative Phase Velocity หรือ Negative Group Velocity โดยปกติแล้ว Group Velocity (V_g) จะมีความสัมพันธ์กับทิศทางของ Pointing's Vector S หรือกล่าวคือ Group Velocity จะมีทิศเดียวกันกับการไหลของพลังงานจากตัวจ่ายไปยังตัวรับ ซึ่งจากหลักการนี้เองจึงนำไปสู่การอธิบายในเรื่องของการกลับทิศ (Reverse) ของ Doppler Effect, Cerenkov Effect และ Snell's Law สมการที่ (11) และ (12) แสดงถึง Wave Vector และสมการของ Phase Velocity

$$k^2 = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 n^2 \quad (11)$$

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

$$v_{ph} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}} \quad (12)$$

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

Doppler Effect

ผลกระทบดอปเพลอร์ (Doppler Effect) นั้นกล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงความถี่และความยาวคลื่นของคลื่นที่ผู้รับ (Observer) ที่เคลื่อนที่สัมพันธ์กับแหล่งจ่ายคลื่น (Source) จะมีความสัมพันธ์กับตัวกลาง (Carrier) ที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านอีกด้วย พิจารณาสมการพื้นฐานของ Doppler Effect ในสมการที่ (13)

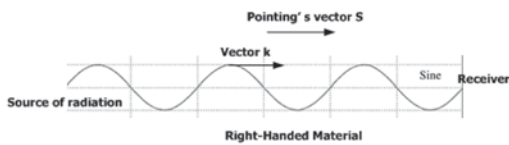
$$\omega = \omega_0 \left(1 - n \frac{v}{c} \right) \tag{13}$$

เมื่อ ω_0 คือความถี่ของตัวจ่าย (Source Frequency), v คือความเร็วของตัวรับ (Receiver Velocity) ซึ่งจะมีทิศทางเป็นบวกเมื่อเคลื่อนที่ออกจากแหล่งจ่าย, c คือความเร็วของแสงซึ่งจะมีเครื่องหมายเป็นบวกเสมอ และ n คือค่า ดัชนีหักเหของแสงของตัวกลางที่สนใจ

โดยทั่วไปแล้วในวัสดุที่เป็น Right-Handed

ความถี่ที่ตัวรับจะรับได้จะมีขนาดที่น้อยกว่าความถี่ของตัวส่ง (ω_0) รูปที่ 11ก. พิจารณาสมการที่ (13) สามารถอธิบายได้ว่าในตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงที่มีค่าติดลบ จะทำให้ขนาดความถี่ของตัวรับมากกว่าตัวจ่าย สังเกตได้จากเมื่อเครื่องหมายของ n เป็นลบจะทำให้สมการที่ (13) มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีผลทำให้เครื่องหมายของ Wave Vector ที่เป็นลบ ตามสมการที่ (11) จะทำให้คลื่นไซน์ (Wave Vector k) เคลื่อนที่เข้าหาแหล่งจ่าย ส่วนคลื่น (Pointing's Vector) เคลื่อนที่ออกไปจากแหล่งจ่าย ซึ่งเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกันตามรูปที่ 11ข.

ผลกระทบ Reversal Doppler นั้นเราสามารถที่จะพบได้ในตัวกลางที่มีค่า ดัชนีหักเหของแสงที่มีค่าติดลบ จากคุณสมบัตินี้ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้นสามารถที่จะทำให้ Train-whistle ของเสียงใน Pitch นั้นสูงขึ้นเมื่อมันเคลื่อนที่เข้ามาถึงและทำให้ระดับเสียงต่ำลงเมื่อ Pitch เคลื่อนที่ออกไป โดยเราสามารถที่จะนำหลักการนี้ไปประยุกต์ใช้ในการติดต่อสื่อสารผ่านโทรศัพท์มือถือซึ่งตอนนี้กำลังอยู่ในขั้นตอนของการทดลองและปรับปรุง



(ก)



(ข)

รูปที่ 11. Pointing's Vector และ Wave Vector ในการเคลื่อนที่ในตัวกลางที่เป็น (ก) Right-Handed และ (ข) Left-Handed Metamaterials.

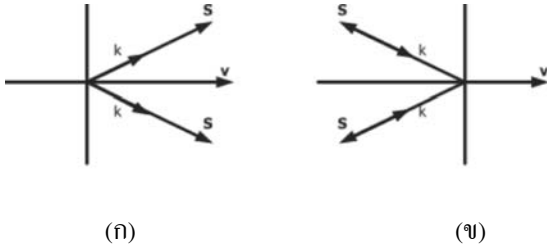
Cherenkov Effect

Cherenkov Effect เป็นผลกระทบหนึ่งที่เกิดจากการที่ค่า Permeability และ Permittivity เป็นลบทั้งคู่ ซึ่งจะกล่าวถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่งด้วยความเร็วที่เร็วกว่าความเร็วแสง ซึ่งหากอนุภาคเคลื่อนที่ไปยังตัวกลางที่มีค่า ดัชนีหักเหของแสงที่มีค่าติดลบ ($n < 0$) ด้วย

ความเร็วที่เร็วกว่าความเร็วแสง อนุภาคเหล่านั้นจะไม่แผ่กระจายออก (Radiated) ไปข้างหน้าตามปกติแต่จะแผ่ออกไปในทิศกลับกัน ตามรูปที่ 12ก. ซึ่งสามารถพิจารณาได้ตามจากสมการที่ (14) สมการของ Angle of Cherenkov Radiation

$$\cos \theta = \frac{c}{vn} \tag{14}$$

เมื่อ c คือความเร็วแสง n คือความเร็วของอนุภาค คือค่า n ดัชนีการหักเหของแสงผ่านตัวกลาง ถ้าค่า ดัชนีการหักเหของแสงกลายเป็นลบ จะเห็นได้ว่ามุม q จะอยู่ในจุดภาคที่ 2 ซึ่งจะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปยังทิศตรงข้ามกับทิศทางตามปกติดังรูปที่ 12 ข.



รูปที่ 12. Cherenkov Effect (ก) - ในตัวกลางที่ $n > 0$, (ข) - ในตัวกลางที่ $n < 0$ เมื่อ v คือเวกเตอร์ของความเร็ว คือ Pointing's Vector, k คือ Wave Vector.

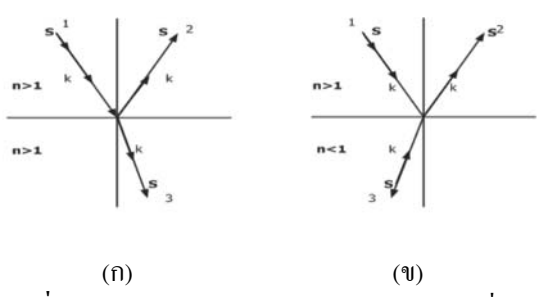
ในทางฟิสิกส์นั้น ผลกระทบจาก Reverse Cherenkov นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านการศึกษาเพื่อที่จะทำการระบุอนุภาคของประจุที่มีความเร็วแตกต่างกัน

Snell's Law

สามารถอธิบายได้ตามสมการที่ (15)

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (15)$$

จากการที่ Wave Vector k มีทิศทางตรงข้ามกับทิศของการเคลื่อนที่ของ Pointing's Vector S จะเป็นที่ทำให้เกิดการกลับทิศตาม Snell's Law (สมการที่(15)) จากรูปที่ 13 พิจารณาการเคลื่อนที่ของคลื่นที่เคลื่อนตัวจากอากาศเข้าสู่ตัวกลางที่ค่าดัชนีการหักเหเป็นลบ ($n < 0$) จะสังเกตเห็นได้ว่าทิศทางการหักเหของคลื่นนั้นจะเบี่ยงเบนออกมาทางด้านเดียวกันกับด้านที่เคลื่อนที่เข้าดังแสดงในรูปที่ 13 ข.



รูปที่ 13. แสดงเส้นทางการสะท้อนของลำแสงที่รอยต่อของสุญญากาศ ($n > 0$) และตัวกลางที่มี (ก) - ค่า $n > 0$ และ (ข) $-n < 0,1$ คือ Incident Beams, 2 คือ Reflected Beams, 3 คือ Refracting Beams. S คือ Pointing's Vector, k คือ Wave Vector.

การประยุกต์ใช้วัสดุเหนือธรรมชาติ

แม้ว่าได้มีการคิดค้น และพัฒนาโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์มาอย่างต่อเนื่อง เริ่มจากการศึกษาโครงสร้าง Split Ring Resonator และ โครงสร้างรวม Metamaterials ที่รวม SRR และ Wires เข้าด้วยกัน โดยกลุ่มวิจัยของ Imperial College (John Pendry และคณะ), UCSD และ Duke University (D. R. Smith และคณะ), MIT (J. A. Kong และคณะ), Iowa State University (N. Katsarakis และคณะ) และอื่นๆ ยังได้มีการคิดค้นโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ ที่มีคุณสมบัติ Chirality และ ดัชนีหักเหของแสงที่มีค่าติดลบ ในโครงสร้างเดียวกัน เพื่อใช้ในอุปกรณ์การตรวจสอบยา (Drug Discovery) เมื่อปี 2006 โดยกลุ่มนักวิจัยจาก University of Massachusetts (A. Akyurtlu และคณะ) ประเทศสหรัฐอเมริกา หรือ การใช้วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์เคลือบเพื่อสร้างวัตถุล่องหน (Invisible Objects) (ค.ศ. 2007) กลุ่มนักวิจัยจาก Imperial College ประเทศอังกฤษ, UCSD และ Duke University และ University of Pennsylvania ประเทศสหรัฐอเมริกา อย่างไรก็ตาม การศึกษาวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ ยังคงอยู่ในระดับเริ่มต้น และยังมีช่องว่างให้ศึกษาและพัฒนา เพื่อประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าและแม่เหล็ก

ไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น วัสดุเคลือบ (Coating Materials), เครื่องกรองสัญญาณ (Filters), ตัวเซ็นเซอร์ (Sensors), สายอากาศ (Antenna), เลนส์ (Lens) โยแก้วนำแสง

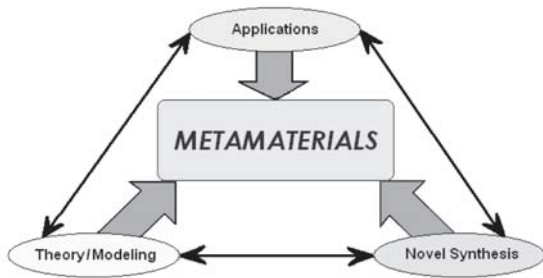
(Fiber Optics) รวมถึงสร้างอุปกรณ์ใหม่ๆ ได้อีกด้วย รูปที่ 14. แสดงตัวอย่างประเภทของ Metamaterials กับการประยุกต์ใช้วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ในด้านต่างๆ

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

รูปที่ 14. แสดงตัวอย่างประเภทของ Metamaterials กับการประยุกต์ใช้วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ในด้านต่างๆ

การศึกษา วิเคราะห์ ทำความเข้าใจหลักการทางกายภาพ (Physics) รวมถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้า (Electric and Electromagnetic Properties) ของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ เช่น Chirality, Isotropy, Bi-anisotropy, Negative Refractive Index จะทำให้เข้าใจพฤติกรรมและผลตอบสนองจากวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ ซึ่งเป็นศาสตร์ใหม่ได้ดียิ่งขึ้น การพัฒนา และปรับปรุงโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ให้มีคุณสมบัติเป็นตามเงื่อนไข และความต้องการของ

อุปกรณ์ไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้า จะสามารถช่วยพัฒนาคุณสมบัติทางไฟฟ้า และแม่เหล็กไฟฟ้า อาทิเช่น ความกว้างของสัญญาณ (Bandwidth) และ การสูญเสีย (Loss) ของอุปกรณ์ดังกล่าวข้างต้นได้ ยิ่งไปกว่านั้น จากคุณสมบัติพิเศษเพิ่มเติมของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ จะช่วยให้สามารถสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่เคยปรากฏว่าสร้างได้ ให้เป็นจริงได้ เช่น Perfect Lenses และ Cloaking Objects รูปที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์กับองค์ความรู้



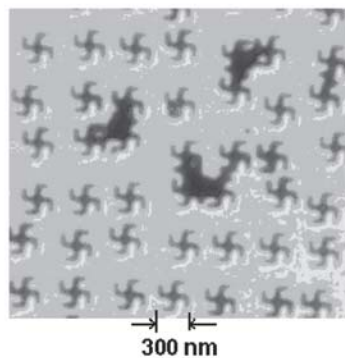
รูปที่ 15. ความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ (Metamaterials) กับ ทฤษฎี/โมเดล (Theory/Modeling), การสังเคราะห์ใหม่ๆ (Novel Synthesis) และการประยุกต์ใช้ (Applications)

วัสดุเหนือธรรมชาติในทศวรรษนี้

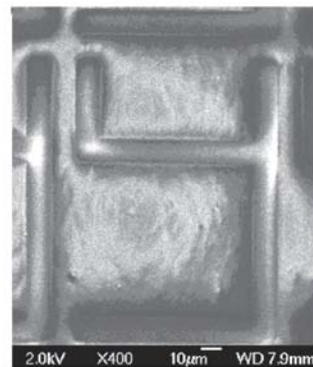
ในช่วงแรก Meta-materials ถูกนำไปใช้ในช่วงความถี่ Microwave (10^9 GHz) ในช่วงความถี่ที่ไม่สูงมากนัก ผลตอบสนองของแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุโลหะจะประพฤติตัวเกือบจะเป็นตัวนำสมบูรณ์ นั่นคือจะมีค่าสภาพยอม (Permittivity) ที่ใหญ่ ในขณะที่ผลตอบสนองทางแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วง

ความถี่ที่สูงขึ้นในช่วงแสง (Optical Regimes) จะมีผลเทียบเคียงกับค่าสภาพยอมของวัสดุหลัก (Host) ซึ่งสามารถทำให้เกิด Surface Plasmon Resonance ได้ ดังนั้นการออกแบบวัสดุโครงสร้างสังเคราะห์ในช่วงความถี่ที่สูงขึ้น จะต้องคำนึงเงื่อนไขต่างๆ ที่เพิ่มขึ้นมาด้วย

ปัจจุบันได้มีการพัฒนา Meta-materials ให้อยู่ในช่วงความถี่ที่สูงในระดับ 10^{12} Hertz หรือ Terahertz (THz) และสูงกว่านั้น เข้าสู่ช่วง Infrared และ Ultraviolet (10^{12} - 10^{15} Hz) เพื่อประยุกต์ใช้งานเครื่องมือต่างๆ เช่น สายอากาศ (Antennas) ที่มีคุณสมบัติสูง, Optical Nanolithography, วงจรไฟฟ้านาโน (Nano-circuits), สารเคลือบเหนือธรรมชาติ (Meta-coatings), Sensings, Spectroscopy และ Microscopy ในช่วงความถี่สูง และเนื่องจากความถี่ของวัสดุประเภทนี้จะแปรผกผันกับขนาดของโครงสร้าง โครงสร้างจึงมีขนาดเล็กลง เข้าสู่ขนาดนาโน (Nano-scale) หรือ 10^{-9} เมตร รูปที่ 16 แสดงตัวอย่างโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสังเคราะห์ Gammadion และ โครงสร้าง Y ในขนาดนาโนและไมโครเมตร



(ก)



(ข)

รูปที่ 16. ตัวอย่างวัสดุแม่เหล็กสังเคราะห์ (ก) โครงสร้าง Gammadion แสดงขนาดในช่วงนาโน (ที่มา: Bagnell et al., 2006) และ (ข) โครงสร้าง Y แสดงขนาดในช่วง ไมโครเมตร (ที่มา: Wongkasem et al. , 2006)

การสร้างวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ให้ทำงานในช่วงความถี่สูง โดยการลดขนาดของโครงสร้างที่ได้มีการพัฒนามาแล้วในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า (ไมโครเวฟ หรือ GHz) อาจเป็นทางเลือกหนึ่ง แต่ในกรณีที่โครงสร้างมีความซับซ้อนมาก การสร้างโครงสร้างก็จะเป็นไปได้ยากหรือไม่สามารถทำได้ในปัจจุบัน การพัฒนาและออกแบบให้โครงสร้างมีรูปแบบที่ง่ายจึงนับเป็นความท้าทายอย่างมาก

Podolskiy (2002) ได้ศึกษา Plasmon Mode ใน Metal Nanowires และวัสดุที่มีค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบ Shalaev (2005) ได้ศึกษาแถวลำดับแบบคาบของ Nanorods ที่มีคุณสมบัติดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบในช่วงความถี่แสง Zhang (2006) และ Dolling (2006) ได้เสนอโครงสร้างรูปวงรีและตาข่ายตามลำดับ ซึ่งโครงสร้างทั้งสองต่างแสดงคุณสมบัติดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบในช่วงความถี่สูงดังกล่าว Zhou (2006) และ Chettiar (2006) ได้ออกแบบวัสดุที่มีค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบในแนวใหม่ โดยใช้การวางวัสดุประเภทตัวนำและกึ่งตัวนำต่างชนิดกันเป็นชั้นๆ Wongkasem (2007) ได้เสนอแนวทางการออกแบบวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ในช่วงความถี่แสงโดยใช้ Quantum Chemistry ทฤษฎีกลุ่มและทฤษฎีตำแหน่งกลุ่ม

แม้ว่าจะมีกลุ่มวิจัยหลายกลุ่มทั่วโลกได้พยายามทำการพัฒนาวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ในขนาดนาโน โดยใช้หลักการของ Photonic Crystals, Transmission Lines, Metal-Dielectric Nanostructures และอื่นๆ อย่างไรก็ตามยังไม่มีข้อสรุปว่าโครงสร้างใดดีที่สุด อีกทั้งวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ในโครงสร้างต่างๆ ก็มีข้อดีข้อเสียต่างกัน และเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในงานที่ต่างกัน ดังนั้นการศึกษาวิเคราะห์ ทำความเข้าใจหลักการทางกายภาพ (Physics) รวมถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้า (Electric and Electromagnetic Properties) ของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ขนาดนาโน เช่น Chirality, Isotropy, Bi-anisotropy, Negative Refractive Index จะทำให้เข้าใจพฤติกรรมและผลตอบสนองจากวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ขนาดนาโนในช่วงความถี่สูง

ที่เป็นศาสตร์และวิทยาการใหม่ได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งก็จะเป็นการช่วยการออกแบบโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ขนาดนาโนได้มีประสิทธิภาพมากขึ้นด้วย การพัฒนาและปรับปรุงโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ขนาดนาโนให้มีคุณสมบัติเป็นตามเงื่อนไขและความต้องการของอุปกรณ์ไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้า จะสามารถช่วยพัฒนาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้า อาทิเช่น ความกว้างของสัญญาณ (Bandwidth) และการสูญเสีย (Loss) ของอุปกรณ์ดังกล่าวข้างต้นได้ ยิ่งไปกว่านั้น จากคุณสมบัติพิเศษเพิ่มเติมของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ขนาดนาโน จะช่วยให้สามารถสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่เคยปรากฏว่าสร้างได้ ให้เป็นจริงได้

สรุป

หลักการสำคัญของวัสดุเหนือธรรมชาติ ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่ ประวัติ พื้นฐานวิธีการสังเคราะห์ และการออกแบบ ประเภท และคุณสมบัติพิเศษของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ทั้งทางด้านฟิสิกส์และแม่เหล็กไฟฟ้าถูกนำมาเสนอ ได้พิจารณาความเป็นไปได้ในการออกแบบวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ด้วยวิธีการต่างๆ ซึ่งวัสดุเหนือธรรมชาติหรือวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ ที่ได้ถูกออกแบบโครงสร้างอย่างเหมาะสม จะมีตัวประกอบของทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่สามารถเชื่อมรวมกับเมตาอะตอม ทำให้เกิดคุณสมบัติใหม่ทางด้านแสง เช่น แสงสองด้านมือ, ดัชนีหักเหของแสงที่มีค่าติดลบ เป็นต้น อีกทั้งได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ กับ ทฤษฎีโมเดล รวมทั้งการสังเคราะห์ใหม่ๆ และ การประยุกต์ใช้ ในเครื่องมืออุปกรณ์ ที่เกี่ยวข้องกับแม่เหล็กไฟฟ้าต่างๆ นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงวัสดุเหนือธรรมชาติในทศวรรษนี้อีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนา
โครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืนและคณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Chen, H., B. I., B. Zhang and J. A. Kong 2007. Electromagnetic Wave Interactions with Metamaterial Cloak. **Phys. Rev. Lett.** 99: 063903.
- Chettiar, U. K., A. V. Kildishev, T. A. Klar and V. M. Shalaev, 2006. Negative Index Metamaterial Combining Magnetic Resonators with Metal Films. **Opt. Express** 14: 7872-7877.
- Dolling G., M.Wegener, C. M. Soukoulis and S. Linden 2006. Negative-Index Material at 780 nm Wavelength. *Preprint at*<http://arxiv.org/abs/physics/0607135>.
- Lamb, H. 1904. "On Group Velocity ." **Proc. Lond. Math. Soc.** 1: 473-479.
- Lindell, I. V., A.H. Sihvola, S.A. Tretyakov and A.J. Viitanen. 1994. **Electromagnetic Waves in Chiral and Bi-Isotropic Media.** Artech House: Boston.
- Marques, R., F. Mesa, J. Martel and F. Medina 2003. Comparative Analysis of Edge and Broadside Coupled Split Ring Resonators for Metamaterials Design-Theory and Experiments. **IEEE Trans. Antennas and Propagat.** 51. 10: 2572-2581.
- Papakostas A., A. Potts, D. M. Bagnell, S. L. Prosvirnin, H. J. Coles and N. I. Zheludev 2003. Optical Manifestations of Planar Chirality. **Phys. Rev. Lett.** 90: 107404 -1-4.
- Pendry, J. B., A. T. Holden, W. J. Stewart and I. Youngs 1996. Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostructures. **Phys. Rev. Lett.** 76: 4773-4776.
- Pendry, J. B., A. J. Holden, D. J. Robbins and W. J. Stewart 1999. Magnetism from Conductors and Enhanced Media, **IEEE Trans. Microwave Theory Tech.** 47, 11: 2075-2084.
- Podolskiy, V. A., A. K. Sarychev and V. M. Shalaev 2002. Plasmon Modes in Metal Nanowires and Left-Handed Materials. **J. Nonlin. Opt. Phys. Mater.** 11: 65-74.
- Saadoum, M. M. I. and N. Engheta 1994. Theoretical Study of Electromagnetic Properties of Non-Local Omega Media. **PIER** 9: 351-397.
- Schurig, D., J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr and D. R. Smith 2006. Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies. **Science Express** 113362.
- Schuster, A. 1904. **An Introduction to the Theory of Optics.** Arnold: London.
- Shalaev, V. M., C. Wenshan, C. K. Uday, Y. Hsiao-Kuan, S. K. Andrey, D. P. Vladimir, and K. V. 2005. Negative Index of Refraction in Optical Metamaterials. **Opt. Lett.** 30 : 3356-3358.
- Shelby, R., D. R. Smith and S. Schultz 2001. Experimental Verification of a Negative Index of Refraction. **Science** 292: 77.
- Smith, D. R., W. J. Padilla, D.C. Vier , S. C. Nemat-Nasser and S. Schultz 2000. Composite Medium with Simultaneously Permeability and Permittivity, **Phys. Rev. Lett.** 84: 4184-4187.

- Veselago, V. G. 1968. Electrodynamics of Substances with Simultaneously Electrical and Magnetic Permeabilities, **Soviet Physics Uspekhi**, 10, 4: 5-13.
- Wongkasem, N., A. Akyurtlu, J. Li, A. Tibolt, Z. Kang and W. D. Goodhue 2006. Novel Broadband THz Negative Refractive Index Metamaterials: Analysis and Experiment, *Progress in Electromagnetic Research*, PIER 64: 205-218.
- Wongkasem, N., A. Akyurtlu and K. A. Marx 2006. Group Theory Based Design of Isotropic Negative Refractive Index Metamaterials, **Progress in Electromagnetic Research**. 63: 295-310.
- Wongkasem N., A. Akyurtlu, K. A. Marx, W.D. Goodhue, J. Li, Q. Dong and E. Ada 2007. Lithographic Fabrication of a Micron Scale Metamaterials Y-Structures-Based Chiral Metamaterial: Theoretical and Experimental Analysis of its Chiral and Negative Index of Refraction Properties in the Terahertz and Microwave Regime. **Microscopy Research and Technique**. 70: 497-505.
- Wongkasem, N., A. Akyurtlu, and K. A. Marx, Q. Dong, J. Li and W.D. Goodhue 2007. Development of Chiral Negative Refractive Index Metamaterials for the Terahertz Frequency Regime. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**. 55, 11: 3052-3062.
- Wongkasem N., 2008. Negative Refractive Index in Nano Organic Compounds Based on Their Chirality, *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and the 2008 USNC/URSI National Radio Science Meeting*, CA, USA.
- Xu, W., L.-W. Li, H.-Y. Yao, and T.-S. Yeo and Q. Wu 2006. Extraction of Constitutive Relation Tensor parameters of SRR Structures using Transmission Line Theory. **J. of Electromagn. Waves and Appl.** 20, 1: 13-25.
- Zhang, S., F. Wenjun, N. C. Panoiu, K. J. Malloy, R. M. Osgood, and S. R. Brueck 2006. Optical Negative-Index Bulk Metamaterials Consisting of 2D Perforated Metal Dielectric Stacks. **Opt. Express** 14: 6778-6787.
- Zhou, J., L. Zhang, G. Tuttle, T Koschny and C.M. Soukoulis 2006. Negative Index Materials using Simple Short Wire Pairs. **Phys. Rev. B** 73: 041101.
- Ziolkowski, R.W. 2003. Design, Fabrication, and Testing of Double Negative Metamaterials. **IEEE Trans. Antennas and Propagat.** 51, 7: 1516-1529.