

อภิวัด Metamaterials

นิวัตร อังควิษฐพันธ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

Niwat Angkawisitpan

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kantarawichai,

Mahasarakham 44150

Tel : 0-4375-4316 E-mail: niwat.a@msu.ac.th

บทคัดย่อ

อภิวัดคือวัสดุชนิดใหม่ที่จัดอยู่ในกลุ่มของวัสดุผสม อภิวัดสามารถแสดงคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่ปกติ ซึ่งไม่สามารถพบได้ในวัสดุทั่ว ๆ ไปในธรรมชาติ เช่น ค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบ และค่าความขบขี้มได้ทางแม่เหล็กเป็นลบ งานวิจัยเกี่ยวกับอภิวัดจะแสดงถึงปรากฏการณ์พิเศษทางฟิสิกส์ และเน้นการพัฒนาอภิวัดเพื่อประยุกต์ใช้งานได้จริงทางด้านไมโครเวฟและการสื่อสาร เช่น การพัฒนาสายอากาศและวัสดุล่องหน บทความนี้จะแนะนำให้รู้จักอภิวัด ประวัติความเป็นมา การจำแนกประเภท การออกแบบ การประยุกต์ใช้งาน และปรากฏการณ์พิเศษทางฟิสิกส์

คำหลัก อภิวัด ดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบ ค่าความขบขี้มได้ทางแม่เหล็กเป็นลบ

Abstract

Metamaterials are a new class of composite materials that exhibit unusual electromagnetic properties that are not found in conventional materials such as negative refractive index and negative magnetic permeability. The research of metamaterials has not only demonstrated interesting physical phenomena but has also led to the development of microwave and communication applications such as antennas and invisible objects. This article provides an introduction to metamaterials: history, classification, design,

applications, and extraordinary physical phenomena.

Keywords: Metamaterials, negative refractive index, negative magnetic permeability.

1. บทนำ

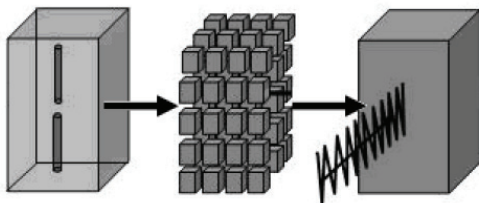
อภิวัด (Metamaterials) คือ วัสดุทางแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่คุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าถูกสังเคราะห์หรือออกแบบขึ้นอย่างเหมาะสมเพื่อให้สนามไฟฟ้า (electric fields) และสนามแม่เหล็ก (magnetic fields) กระทำปฏิกิริยาร่วมกับอะตอมเทียม (artificial atoms) และเกิดคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าตามที่ต้องการได้ [1]

คุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้กล่าวไปแล้วนั้นคือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (electric permittivity, ϵ) ค่าความขบขี้มได้ทางแม่เหล็ก (magnetic permeability, μ) และค่าดัชนีการหักเหของแสง (refractive index, n) โดยทั่วไปวัสดุในธรรมชาติจะมีค่าความขบขี้มได้ทางแม่เหล็ก และค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็นบวก ซึ่งเกิดจากอะตอมของเนื้อวัสดุนั้น ๆ ทำปฏิกิริยาร่วมทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เมื่อเราทำการออกแบบอะตอมเทียมสำหรับอภิวัดให้มีลักษณะของโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป ทำให้เราสามารถออกแบบคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ต่างออกไปจากที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น ค่าความขบขี้มได้ทางแม่เหล็กเป็นลบ และค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบ เป็นต้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เราไม่สามารถหาได้ในวัสดุธรรมชาติ ด้วยเหตุผลนี้วัสดุทางแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดนี้

จึงถูกขนานนามอีกว่า “วัสดุเหนือธรรมชาติ” [2]

โครงสร้างของอะตอมเทียมที่ประกอบขึ้นเป็นอภิวัดจะถูกจัดเรียงเป็นลักษณะโครงสร้างคาบ (periodic structures) และขนาดของโครงสร้างของอะตอมเทียมจะมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในช่วงทำงาน (operating wavelength) เพื่อที่จะทำให้อภิวัดนี้แสดงคุณสมบัติความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogenous property) และโครงสร้างคาบของอะตอมเทียมนี้ จะประพฤติตัวเป็นเหมือนอะตอมที่จะมีปฏิกิริยากระทำร่วมกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 1 [3]



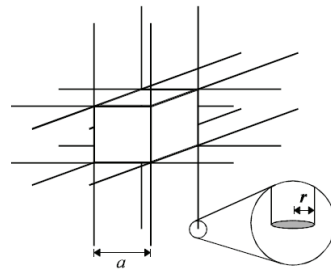
รูปที่ 1 โครงสร้างอภิวัดแบบรายคาบกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [3]

คำว่า “Meta” เป็นภาษากรีก หมายความว่า “อภิ” “ยิ่ง” “ใหญ่” หรือ “เหนือ” และคำว่า “Materials” แปลว่า “วัสดุ” หรือ “วัตถุ” เราอาจกล่าวได้ว่า อภิวัดคือวัสดุที่มีคุณสมบัติเหนือวัสดุที่มีอยู่ในธรรมชาติ เพราะเราไม่สามารถหาวัสดุที่มีอยู่ในธรรมชาติที่มีค่าความซบซึ่มได้ทางแม่เหล็ก และค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบได้ แต่เราสามารถหาได้จากอภิวัด

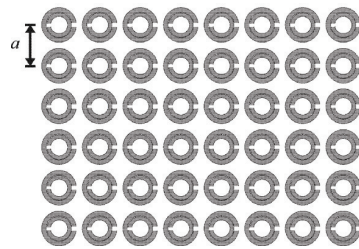
มีการศึกษาอภิวัดเริ่มแรกในปี ค.ศ. 1904 โดย A. Schuster [4] ซึ่งได้ศึกษาความเร็วเฟสที่เป็นลบในอภิวัด (negative phase velocity) หลังจากนั้นได้มีการทิ้งช่วงการศึกษาอภิวัดไปกว่า 6 ทศวรรษ จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1968 V. G. Veselago นักวิทยาศาสตร์ชาวรัสเซีย ได้เผยแพร่งานวิจัยเรื่องอภิวัดในวารสารวิชาการของประเทศรัสเซีย ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับวัสดุที่มีค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบเนื่องจาก วัสดุนั้นมีค่าความซบซึ่มได้ทางแม่เหล็ก และค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเป็นลบในช่วงความยาวคลื่นเดียวกันของแสง ซึ่งไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในวัสดุธรรมชาติ เขาได้แสดงปรากฏการณ์ทางแสงที่สามารถเกิดขึ้นได้ในอภิวัดชนิดนี้ ซึ่งเป็นเพียงการแสดงผลทางทฤษฎีเท่านั้น [5]

จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1996 J. B. Pendry และคณะ

ได้เผยแพร่งานวิจัยจากการทดลองเกี่ยวกับอภิวัดชิ้นใหม่ ในงานวิจัยชิ้นนี้ เขาได้นำเสนอโครงสร้างอภิวัดที่ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเป็นลบจากโครงสร้างแถวลำดับของเส้นลวด (array of wires) [6] ดังแสดงในรูปที่ 2 จากนั้นอีก 3 ปีต่อมา เขาก็ได้นำเสนอโครงสร้างของอภิวัดที่มีค่าความซบซึ่มได้ทางแม่เหล็กเป็นลบจากโครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยก (Split Ring Resonators, SRR) [7] ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2 โครงสร้างแถวลำดับเส้นลวดของ J.B.Pendry และคณะ [6]



รูปที่ 3 โครงสร้างตัวกำทอนชนิดวงแหวนแยกของ J.B.Pendry และคณะ [7]

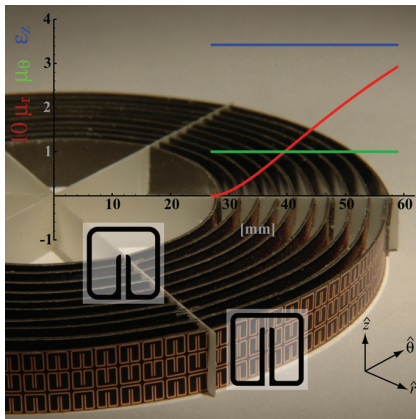
จากนั้นในปี ค.ศ. 2000 D. R. Smith และคณะ [8] ได้สร้างอภิวัดประเภทที่มีค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบ จึงถือได้ว่าเป็นยุคเริ่มต้นของอภิวัดประเภทดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบ (negative refractive index metamaterials) รูปที่ 4 แสดงอภิวัดประเภทค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบ



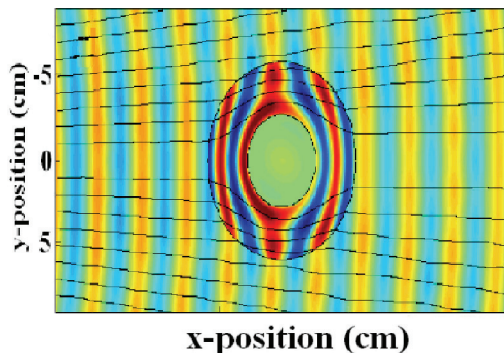
รูปที่ 4 อภิวัดประเภทค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบของ

D.R.Smith และคณะ [8]

ด้วยคุณสมบัติพิเศษจากอภิวัดที่สามารถถูกออกแบบให้มีค่าคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าตามที่ต้องการ ซึ่งต่างจากวัสดุในธรรมชาติ ทำให้ D. Schurig และคณะ ได้ทำการออกแบบและสร้างวัสดุล่องหนจากอภิวัดในช่วงความถี่ไมโครเวฟ (cloaking device) ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 ผลงานวิจัยชิ้นนี้ได้ถูกเผยแพร่ในปี ค.ศ. 2006 [9] ผลงานชิ้นนี้เป็นที่กล่าวถึงกันอย่างมากในการวิจัยของสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 5 วัสดุล่องหนในช่วงความถี่ไมโครเวฟที่ทำจากอภิวัดของ D.Schurig และคณะ [9]

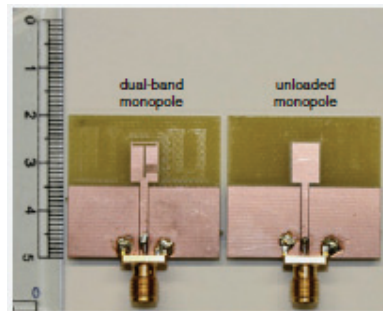


รูปที่ 6 ผลการจำลองของคลื่นไมโครเวฟที่ถูกแพร่ผ่านวัสดุล่องหนในรูปที่ 5 [9]

2. การประยุกต์ใช้งาน

นอกจากวัสดุล่องหนแล้วยังมีผลงานวิจัยที่ได้จากการพัฒนาอภิวัดอีก เช่น สายอากาศแบบทำงาน 2 ช่วงความถี่สำหรับระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย (WLAN antenna) ถูกพัฒนาโดย J. Zhu และคณะ ดังรูปที่ 7 โดยใช้สายอากาศขั้วเดี่ยวแบบระนาบ (planar monopole antenna) เพื่อให้ช่วงความถี่ทำงานที่ความถี่ 5.2 GHz และใช้อภิวัดเป็นตัวกำเนิดกำหนด เพื่อให้เกิดช่วง

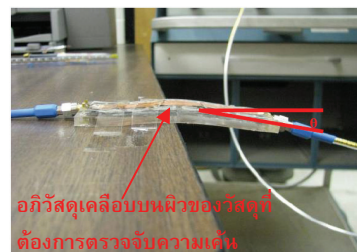
ความถี่ทำงานที่ความถี่ 2.4 GHz ซึ่งไม่จำเป็นต้องขยายขนาดของสายอากาศ [10] การลดขนาดของสายอากาศด้วยอภิวัดถูกพัฒนาโดย N. Angkawisitpan ดังรูปที่ 8 โดยอาศัยการเกิดกำหนดจากโครงสร้างกำหนดแบบวงแหวนแยกที่ความถี่ทำงานที่ต้องการ [3] และการใช้อภิวัดในการตรวจจับความเค้นหรือรอยแตกของผิววัสดุทั่วไป ถูกพัฒนาโดย N. Angkawisitpan และคณะ ดังรูปที่ 9 โดยอาศัยการเลื่อนของความถี่กำหนด (resonant frequency) เมื่อผิวของวัสดุมีความเค้นเกิดขึ้น [11]



รูปที่ 7 สายอากาศแบบทำงาน 2 ช่วงความถี่ด้วยอภิวัด [10]



รูปที่ 8 การลดขนาดสายอากาศด้วยอภิวัด [3]



รูปที่ 9 การตรวจจับความเค้นหรือรอยแตกของวัสดุด้วยอภิวัด [11]

จากคุณสมบัติพิเศษที่ไม่มีในวัสดุธรรมชาติและความสามารถของอภิวัดที่สามารถถูกนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านฟิสิกส์ วิศวกรรมไมโครเวฟ วิศวกรรมแสง

วิศวกรรมสื่อสาร และด้านอื่น ๆ ทำให้อิทธิพลถูกจัดให้เป็นหนึ่งในสิบของสิ่งประดิษฐ์หรือสิ่งที่ค้นพบแห่งปีจากวารสารวิทยาศาสตร์ (science journal) ในปี ค.ศ. 2003 [12]

3. การออกแบบอภิวัด

จากคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอภิวัด เราสามารถแบ่งประเภท และออกแบบอภิวัดประเภทต่าง ๆ ได้ดังนี้

3.1 อภิวัดประเภทค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเป็นลบ

ในการออกแบบโครงสร้างของอะตอมเทียมในอภิวัดให้มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเป็นลบ จะใช้หลักการการเกิดพลาสมอน (plasmon) หรือหลักการที่กลุ่มของอิเล็กตรอน (electrons) ในโลหะมีตระกูล (noble metals) เกิดการสั่น (oscillation) เนื่องจากมันถูกกระตุ้นด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูง ๆ ในย่านความถี่แสง ความถี่ที่ใช้ในการกระตุ้นจะต้องมีความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่พลาสมา (plasma frequency, ω_p) ของโลหะมีตระกูลนั้น ๆ เพื่อให้เกิดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเป็นลบ ซึ่งมีรูปแบบดรูด (Drude model) ดังสมการที่ (1) [1]

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

เมื่อ ω_p คือความถี่พลาสมาของโลหะมีตระกูลใด ๆ (มีหน่วยเป็น เรเดียนต่อวินาที) และ γ คือความถี่ของการหน่วง (damping frequency) ซึ่งเป็นส่วนของการสูญเสียของการแพร่กระจายของพลังงานเข้าไปในเนื้อโลหะ ตัวอย่างของค่าความถี่พลาสมา และความถี่ของการหน่วงของโลหะมีตระกูลบางชนิดแสดงในตารางที่ 1 [13]

ตารางที่ 1 ความถี่พลาสมา และความถี่ของการหน่วงของโลหะมีตระกูลบางชนิด [13]

โลหะมีตระกูล	ความถี่พลาสมา (เรเดียนต่อวินาที)	ความถี่การหน่วง (เรเดียนต่อวินาที)
เงิน	1.37×10^{16}	2.73×10^{13}
ทองคำ	1.37×10^{16}	4.07×10^{13}
ทองแดง	1.20×10^{16}	5.24×10^{13}

จากหลักการตามสมการที่ (1) J.B. Pendry และคณะได้ทำการสร้างอภิวัดชนิดนี้โดยการนำเส้นลวดอลูมิเนียมมาจัดเรียงให้เป็นโครงสร้างคาบ และมีความยาวอนันต์

ดังรูปที่ 2 [6] จากนั้นเขาทำการทดลองโดยการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบระนาบ (electromagnetic planewave) กระทั่งกับอภิวัดชนิดนี้ เพื่อทำการวัดและคำนวณหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้ายังผล (effective electric permittivity, ε_{eff}) ผลการทดลองพบว่า ค่าความถี่พลาสมาของโครงสร้างลักษณะนี้มีค่าดังสมการที่ (2)

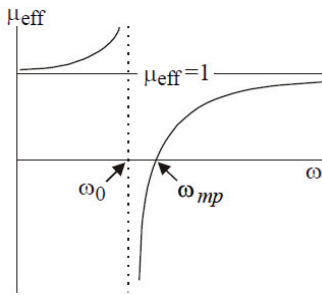
$$\omega_p = \frac{2\pi c_0^2}{a^2 \ln\left(\frac{a}{r}\right)} \quad (2)$$

เมื่อ a คือ ระยะห่างระหว่างเส้นลวด (เมตร) r คือ รัศมีของเส้นลวด (เมตร) และ c_0 คือ ความเร็วแสงขนาด 3×10^8 เมตรต่อวินาที ดังนั้นค่าสภาพยอมทางไฟฟ้ายังผลของอภิวัดชนิดนี้ ณ ทุกความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่พลาสมา จะมีค่าเป็นลบ

3.2 อภิวัดประเภทค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กเป็นลบ

ในการออกแบบโครงสร้างของอะตอมเทียมในอภิวัดให้มีค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กเป็นลบ จะใช้หลักการการเกิดกำทอน (resonance) ในโครงสร้างของตัวกำทอนแบบวงแหวนแยก (Split Ring Resonators, SRR) ดังรูปที่ 3 [7] เมื่อ J.B. Pendry และคณะ ได้ทำการทดลองโดยการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบระนาบ กระทั่งกับอภิวัดชนิดนี้ เพื่อทำการวัดและคำนวณหาค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กยังผล (effective magnetic permeability, μ_{eff}) ผลการทดลองพบว่า ค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กยังผลมีค่าเป็นลบในช่วงระหว่างความถี่กำทอนทางแม่เหล็ก (magnetic resonant frequency, ω_0) และความถี่พลาสมาทางแม่เหล็ก (magnetic plasma frequency, ω_{mp}) ดังแสดงในรูปที่ 10 ค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กจะมีรูปแบบลอเรนซ์ (Lorentz model) และสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

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



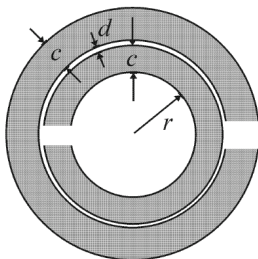
รูปที่ 10 ค่าความซบซึ่มได้ทางแม่เหล็กยังผลของอภิวัดชนิดตัว
กำทอนแบบวงแหวนแยก [7]

จากรูปที่ 10 ความถี่กำทอนทางแม่เหล็ก (ω_0) และ
ความถี่พลาสมาทางแม่เหล็ก (ω_{mp}) สามารถคำนวณได้
จากสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{3dc_0^2}{\pi^2 r^3}} \quad (4)$$

$$\omega_{mp} = \sqrt{\frac{3dc_0^2}{\pi^2 r^3 (1 - \frac{\pi r^2}{a^2})}} \quad (5)$$

เมื่อ a d r และ c ถูกระบุไว้ในรูปที่ 3 และ 11 และค่าคงที่
อื่น ๆ มีค่าดังต่อไปนี้ ค่า $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ เฮนรีต่อเมตร
 $c_0 = 3 \times 10^8$ เมตรต่อวินาที $i = \sqrt{-1}$ และค่า $\sigma =$
200 ถึง 2,000



รูปที่ 11 ลักษณะของอะตอมเทียมเพียงอะตอมเดียวของอภิวัด
ชนิดตัวกำทอนแบบวงแหวนแยก [7]

3.3 อภิวัดประเภทค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบ

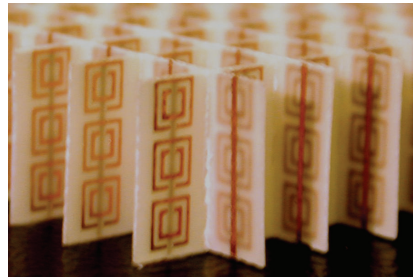
ในการออกแบบโครงสร้างของอะตอมเทียมในอภี
วัสดุให้มีค่าดัชนีการหักเหของแสงยังผล (effective
refractive index, n_{eff}) เป็นลบ มีหลายหลักการที่จะได้

กล่าวต่อไปนี้

3.3.1 R.A. Shelby และ คณะ [14] ได้ใช้หลักการพื้นฐาน
ตามสมการที่ (6)

$$n_{eff}(\omega) = -\sqrt{\mu_{eff}(\omega) \epsilon_{eff}(\omega)} \quad (6)$$

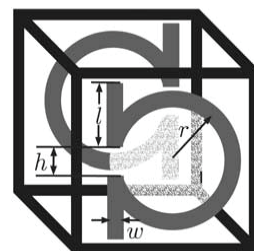
ซึ่งก็คือการนำเอาโครงสร้างของแถวลำดับของเส้นลวดที่มี
ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเป็นลบมาอยู่รวมกันกับ
โครงสร้างตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกที่มีค่าความซบ
ซึ่มได้ทางแม่เหล็กเป็นลบ เพื่อให้ค่าดัชนีการหักเหของ
แสงยังผลเป็นลบ โครงสร้างดังกล่าวแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 ลักษณะของอภิวัดที่เกิดจากนำโครงสร้างแถวลำดับของ
เส้นลวดมารวมกับโครงสร้างของตัวกำทอนแบบวงแหวนแยกของ

R.A. Shelby และคณะ [14]

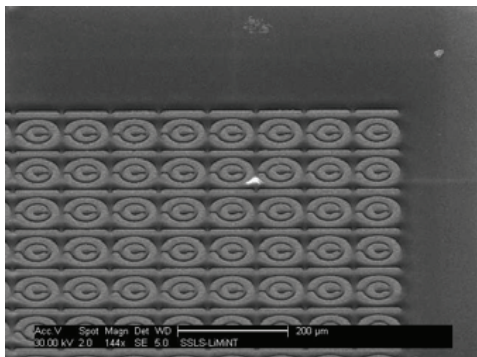
3.3.2 C.R. Simovski และ คณะ [15] ได้ออกแบบ
โครงสร้างของอภิวัดใหม่เพื่อให้มีค่าดัชนีการหักเหของ
แสงยังผลเป็นลบโดยการดัดแปลงโครงสร้างของตัวกำ
ทอนแบบวงแหวนแยกให้มีเส้นลวดยาวขึ้นที่ตำแหน่งแยก
ทำให้โครงสร้างนี้มีลักษณะคล้ายกับตัวอักษรกรีกที่
เรียกว่า โอเมกา (Omega, Ω) ทำให้ได้ค่าสภาพยอม
ทางไฟฟ้าและค่าความซบซึ่มได้ทางแม่เหล็กเป็นลบใน
โครงสร้างเดียวกัน โครงสร้างโอเมกาดูได้จากรูปที่ 13



รูปที่ 13 ลักษณะของอะตอมเทียมของอภิวัดที่มีค่าดัชนีการหักเห
ของแสงยังผลเป็นลบของ C.R. Simovski และคณะ [15]

นอกเหนือจากการออกแบบและสร้างอภิวัดในช่วงความถี่ไมโครเวฟแล้ว กลุ่มนักวิจัยหลายกลุ่มได้ทำการขยายขอบเขตของการศึกษาอภิวัดไปในระดับความถี่แสง การที่จะให้อภิวัดทำงานในระดับความถี่แสงที่มีความยาวคลื่นที่สั้นในระดับนาโนเมตร (400-800 นาโนเมตร) จะต้องสร้างอะตอมเทียมของอภิวัดให้ได้ขนาดระดับนาโนเมตรเช่นกัน นับว่าเป็นโชคดีเพราะในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีทางด้านนาโน (nanotechnology) ของโลกได้พัฒนาอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว ทำให้ไม่ปัญหาและอุปสรรคต่องานวิจัยทางด้านอภิวัดในระดับความถี่แสง

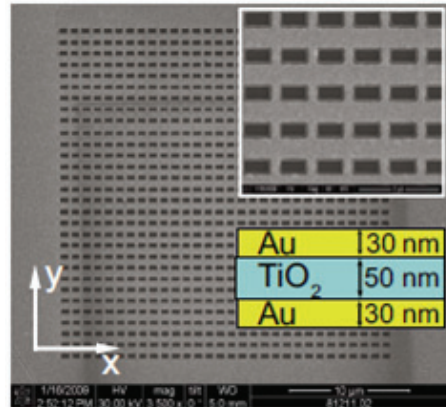
3.3.3 B.D.F. Casse และ คณะ [16] ได้นำโครงสร้างของอภิวัดของ R.A.Shelby และคณะ ไปสร้างในระดับนาโนเมตร เพื่อให้ให้อภิวัดนี้ให้ค่าดัชนีการหักเหของแสงยังผลเป็นลบในช่วงใกล้ความถี่แสง รูปที่ 14 แสดงโครงสร้างระดับนาโนเมตรของอะตอมเทียมจากทองคำบนแผ่นเวเฟอร์ซิลิคอน (Silicon wafer)



รูปที่ 14 อภิวัดที่มีค่าดัชนีการหักเหของแสงยังผลในช่วงใกล้ความถี่แสงเป็นลบที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรของ B.D.F. Casse และคณะ [16]

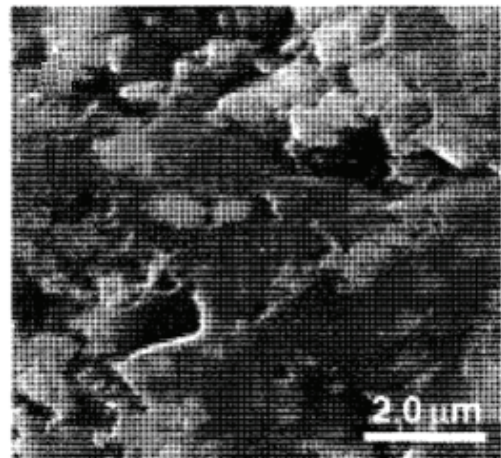
3.3.4 A. Minovich และ คณะ [17] ได้ออกแบบโครงสร้างของอภิวัดในรูปแบบตาข่ายปลา (fishnet) ซึ่งโครงสร้างตาข่ายปลาจะมีด้วยกัน 3 ชั้นคือ ทองคำ(Au)-ไทเทเนียมไดออกไซด์(TiO_2)-ทองคำ(Au) การสานกันของตาข่ายนี้จะทำให้ได้รับค่าความขบขี้มได้ทางแม่เหล็กเป็นลบจากวงจรวนรอบ (loop circuit) ของทั้ง 3 ชั้น และแถวลำดับรายคาบของเส้นลวดทองคำจะให้ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเป็นลบ โดยอาศัยหลักการเดียวกันงานวิจัยของ J.B.Pendy และคณะ ในปี ค.ศ.1996 [6] ด้วยเหตุนี้ทำให้เราได้อภิวัดประเภทดัชนีการหักเหของ

แสงยังผลเป็นลบในช่วงความถี่แสงที่มีรูปร่างเป็นแบบตาข่ายปลา ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 อภิวัดแบบตาข่ายปลาที่มีค่าดัชนีการหักเหของแสงยังผลในช่วงความถี่แสงเป็นลบ ของ A.Minovich และคณะ [17]

3.3.5 A. Kussow และ คณะ [18] ซึ่งผู้เขียนเป็นหนึ่งในสมาชิกของกลุ่มวิจัยนี้ได้ออกแบบ และสร้างอภิวัดในลักษณะของวัสดุผสม (composite material) อภิวัดชนิดนี้เกิดจากการผสมระหว่าง แมกนีเซียมไดโบไรด์ (Magnesium Diboride, MgB_2) และ ซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide, SiC) ในอัตราส่วนหนึ่งตามทฤษฎีของเลวิน (Lewin Theory) และทฤษฎีของแมกซ์เวลล์การ์เนตต์ (Maxwell Garnett Theory) ทำให้ได้รับค่าดัชนีการหักเหของแสงยังผลเป็นลบในช่วงความถี่แสง และมีค่าการสูญเสียที่ต่ำอีกด้วย รูปที่ 16 แสดงภาพถ่ายของอภิวัดแบบวัสดุผสมที่ได้ [19]



รูปที่ 16 ภาพถ่ายของอภิวัดแบบวัสดุผสมที่มีค่าดัชนีการหักเหของแสงยังผลในช่วงความถี่แสงเป็นลบ [19]

4. ปรากฏการณ์พิเศษทางฟิสิกส์ของอภิวัด

นอกเหนือจากเทคนิคต่าง ๆ ในการออกแบบอภิวัดที่เราได้ทราบมาแล้ว อภิวัดยังมีคุณสมบัติพิเศษทางฟิสิกส์อีกด้วย เช่น

4.1 ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์แบบทวนกลับ

ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ (Doppler Effect) คือ ปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่ความถี่และความยาวคลื่นของสัญญาณจากผู้ส่ง (transmitter) มาถึงผู้รับ (receiver) ได้ถูกเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากความเร็วสัมพัทธ์ (relative velocity) ระหว่างผู้ส่งเทียบกับผู้รับ สมการที่ (7) แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าว

$$\omega = \omega_0 \left(1 - n \frac{v}{c_0}\right) \quad (7)$$

เมื่อ ω_0 คือ ความถี่ของสัญญาณจากผู้ส่ง v คือ ความเร็วสัมพัทธ์ของผู้ส่งเทียบกับผู้รับ c_0 คือ ความเร็วแสง 3×10^8 เมตรต่อวินาที n คือดัชนีการหักเหของแสงของตัวกลาง (medium) และ ω คือความถี่ของสัญญาณที่ปรากฏต่อผู้รับ

โดยปกติ เมื่อความเร็วสัมพัทธ์ของผู้ส่งเทียบกับผู้รับเป็นบวก และค่าดัชนีการหักเหของแสงของตัวกลางเป็นบวก จะทำให้ความถี่ของสัญญาณที่ปรากฏต่อผู้รับมีค่าต่ำกว่าความถี่ของสัญญาณจากผู้ส่ง ดังสมการที่ (7) อย่างไรก็ตามเมื่อความเร็วสัมพัทธ์ของผู้ส่งเทียบกับผู้รับยังคงเป็นบวก แต่ค่าดัชนีการหักเหของแสงของตัวกลางเป็นลบ (เช่น ตัวกลางอภิวัดประเภทดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบ) จะทำให้ความถี่ของสัญญาณที่ปรากฏต่อผู้รับมีค่าสูงกว่าความถี่ของสัญญาณจากผู้ส่ง ปรากฏการณ์แบบนี้เรียกว่า “ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์แบบทวนกลับ (Reversal of Doppler Effect)”

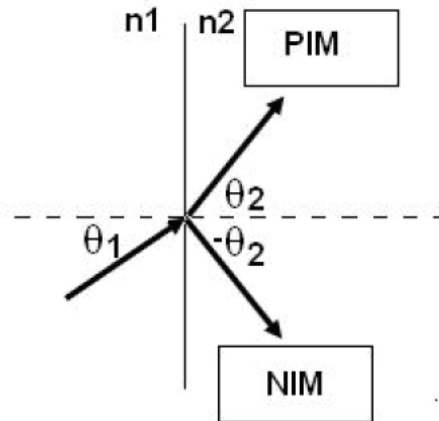
4.2 กฎของสเนลล์แบบทวนกลับ

กฎของสเนลล์ (Snell's Law) คือกฎที่ว่าด้วยความสัมพันธ์ของมุมที่ตกกระทบ (incident angle, θ_1) มุมที่หักเห (refraction angle, θ_2) และค่าดัชนีการหักเหของแสงของตัวกลาง 2 ชนิด (n_1 และ n_2) ดังสมการที่ (8)

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (8)$$

เมื่อใดก็ตามที่ตัวกลาง n_2 มีค่าเป็นลบ จะทำให้ θ_2 มีค่าเป็นลบด้วย เพื่อรักษาไว้ซึ่งกฎของสเนลล์ ด้วยเหตุนี้จึง

ทำให้มุมของการหักเหของแสงในตัวกลาง n_2 มีค่าเป็นลบ นั่นก็คือมุมการหักเหจะเป็นไปในทิศทางมุมลบ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “ปรากฏการณ์ของสเนลล์แบบทวนกลับ (Reversal of Snell's Law)” รูปที่ 17 แสดงปรากฏการณ์ของสเนลล์และปรากฏการณ์ของสเนลล์แบบทวนกลับ เมื่อ PIM คือ ตัวกลาง n_2 มีค่าเป็นบวก และ NIM คือ ตัวกลาง n_2 มีค่าเป็นลบ



รูปที่ 17 แสดงปรากฏการณ์ของสเนลล์และปรากฏการณ์ของสเนลล์แบบทวนกลับ [3]

4. บทวิเคราะห์

จากการปรัศนัวรรณกรรมของอภิวัด ผู้เขียนได้กล่าวถึงคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอภิวัดที่ไม่สามารถพบได้ในวัสดุธรรมชาติทั่ว ๆ ไป เช่น ค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบ และค่าความขบขั้มได้ทางแม่เหล็กเป็นลบ ในบทความนี้ ผู้เขียนได้จำแนกอภิวัดออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ ตามคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้า และยังได้กล่าวถึงวิธีการออกแบบในแต่ละกลุ่มด้วย นอกจากคุณสมบัติพื้นฐานของอภิวัดที่ผู้เขียนได้กล่าวไปแล้วนั้น ผู้เขียนยังได้แนะนำการประยุกต์ใช้งานจริง เช่น การรวมเอาอภิวัดเข้ากับอุปกรณ์ทางด้านโทรคมนาคมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ทางด้านโทรคมนาคม และการตรวจจับความเค้นบนผิวของวัสดุทั่วไป ผู้เขียนเห็นว่า งานวิจัยทางด้านอภิวัดในระยะเริ่มต้นจะเน้นที่เทคนิคในการออกแบบ และสร้างอภิวัด เพราะงานวิจัยทางด้านอภิวัดยังเป็นงานวิจัยในระยะเริ่มต้น ในขณะที่งานวิจัยทางด้านอภิวัดในปัจจุบันจะเน้นให้อภิวัดมีส่วนเกี่ยวข้องในการพัฒนาอุปกรณ์

ทางด้านวิศวกรรมสื่อสาร วิศวกรรมแสง และวิศวกรรมไมโครเวฟ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง จุดนี้เป็นจุดสำคัญที่จะทำให้วงการวิจัย และกลุ่มสนับสนุนการวิจัย เช่น กองทุนวิจัยต่าง ๆ และรัฐบาลประเทศต่าง ๆ ได้หันมาให้ความสนใจที่จะสนับสนุนและพัฒนาต่อยอด และผลิตนวัตกรรมใหม่ ๆ ที่ใช้อิวิสต์เข้าไปเกี่ยวข้องในการออกแบบ

5. สรุป

ในบทความฉบับนี้ ผู้เขียนได้ทำการปริทัศน์วรรณกรรมเกี่ยวกับอิวิสต์ ซึ่งได้กล่าวถึง ความหมาย ประวัติ การแยกประเภท การออกแบบ และปรากฏการณ์พิเศษทางฟิสิกส์ของอิวิสต์ นอกจากนี้บทความนี้ยังได้กล่าวถึงการประยุกต์ใช้งาน ซึ่งจะมีประโยชน์ในการพัฒนาอุปกรณ์ทางด้านไมโครเวฟและการสื่อสาร

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคามที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Engheta, N. and Ziolkowski, R.W. 2006. Metamaterials: physics and engineering explorations. John Wiley & Sons, Inc: USA.
- [2] นันทกานต์ วงศ์เกษม และ คณิศร์ มาตรา. 2552. วัสดุเหนือธรรมชาติ. วารสารวิจัย มข. 14(2): 133-149
- [3] Angkawisitpan, N. 2009. Novel technique for 3D isotropic metamaterial fabrication. Ph.D. Dissertation, University of Massachusetts Lowell. Lowell, MA, USA.
- [4] Schuster, A. 1904. An introduction to the theory of optics. Arnold: London.
- [5] Veselago, V.G. 1968. Electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . Soviet Physics Uspekhi. 10(4): 509-514.
- [6] Pendry, J.B., Holden, A.J., Stewart, W.J. and Youngs, I. 1996. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures. Physical Review Letters. 76: 4773-4776.
- [7] Pendry, J.B., Holden, A.J., Robbins, D.J. and Stewart, W.J. 1999. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 47(11): 2075-2084.
- [8] Smith, D.R., Padilla, W.J., Vier, D.C., Nemat-Nasser S.C. and Schultz, S. 2000. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. Physical Review Letters. 84(18): 4184-4187.
- [9] Schurig, D., Mock, J.J., Justice, B.J., Cumber S.A., Pendry J.B., Starr, A.F. and Smith, D.R. 2006. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies. Science. 314(5801): 977-980.
- [10] Zhu, J., and Eleftheriades, G.V. 2009. Dual-band Metamaterial-inspired small monopole antenna for wifi applications. Electronics Letters. 45(22): 1104-1106.
- [11] Angkawisitpan, N., and Akyurtlu, A. 2008. Strain sensors based on metamaterials. 2008 International Conference on Material Research Society Fall Meeting. Boston, Massachusetts, USA.
- [12] The News and Editorial Staffs 2003. Breakthrough of the year: the runners-up. Science. 302(5653): 2039-2045
- [13] Ordal, M.A., Long L.L., Bell, R.J., Bell, S.E., Bell, R.R., Alexander, Jr., R.W. and Ward, C.A. 1983. Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared. Applied Optics. 22(7): 1099-1120.
- [14] Shelby, R.A., Smith, D.R., and Schultz, S. 2001. Experimental verification of a negative index of

- refraction. *Science*. 292(5514): 77-79.
- [15] Simovski, C.R., and He, S. 2003. Frequency range and explicit expressions for negative permittivity and permeability for an isotropic medium formed by a lattice of perfectly conducting Ω particles. *Physics Letters A*. 311(3): 254-263.
- [16] Casse, B.D.F., Moser, H.O., Wilhelmi, O., and Saw, B.T. 2005. Micro- and nano-fabrication of electromagnetic metamaterials for the terahertz range. *Proceedings of 3rd International Conference on Materials for Advanced Technologies*. July 3-8, 2005: 55-58.
- [17] Minovich, A., Neshev, D.N., Powell, D.A., Shadrivov, I.V., Lapine, M., McKerracher, I., Hattori, H.T., Tan, H.H., Jagadish, C., and Kivshar, Y. 2010. Tilted response of fishnet metamaterials at near-infrared optical wavelengths. *Physical Review B*. 81(11): 115109-1-115109-6.
- [18] Kussow, A., Akyurtlu, A., Semichaevsky, A., and Angkawisittpan, N. 2007. MgB_2 -based negative refraction index metamaterial at visible frequencies: theoretical analysis. *Physical Review B*. 76(19): 195123-1-195123-7.
- [19] Limberopoulos, N., Akyurtlu, A., Higginson, K., Kussow, A., and Merritt, C.D. 2009. Negative refractive index metamaterials in the visible spectrum based on MgB_2/SiC composites. *Applied Physics Letters*. 95(2): 023306-1-195123-3.