تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۶/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۲۴

فصلنامه علوم و فنون نظامی
سال سیزدهم، شماره ۳۹، بهار ۱۳۹۶
صص ۷۸- ۵۹

مروری بر ساختار و خواص فراMواد و کاربردهای آن‌ها در سامانه‌های نظامی

جعفر خلیل‌پور[۱]
مجید عندلیبی کمال[۲]

چکیده

فراMواد، دسته‌ای از مواد مصنوعی ساخت انسان می‌باشند، که از ترکیب آرایه‌ای از میله‌ها و حلقه‌های فلزی بوجود می‌آیند. این دسته از مواد در مقابل تابش امواج الکترومغناطیسی، خواص جالب توجه و غیرمعمولی نظیر ضریب شکست منفی از خود نشان می‌دهند. خواص جالب توجه فراMواد، باعث بکارگیری گسترده آن‌ها در زمینه‌های مختلف مایکروویو، آنتن‌های هوشمند، لنزها و.. شده است. از جنبه نظامی، نیز می‌توان از فراMواد در نامرئی‌سازی پرنده‌های خودی نظیر پهپاد، موشک و... استفاده‌کرد. درساخت پوشش نامرئی و همچنین طراحی شیلد و بهبود ضریب شیلدینگ برای ایمنی سیستم‌های نظامی و اتاق‌های جنگ با استفاده از فراMواد استفاده شده‌است. در این مقاله ضمن تشریح ساختار فراMواد، خواص آن‌ها در مواجهه با امواج الکترومغناطیسی بطور کامل توضیح‌داده شده‌است. و همچنین مروری کامل بر روش‌های بکارگیری این دسته از فراMواد در آنتن‌ها مورد بررسی قرارگرفته‌است، که نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده افزایش پارامترهایی مانند سمت‌گرایی، توان تشعشعی، پهنای باند و در نهایت کوچک‌سازی و چند باندی‌کردن در آنتن‌های مرجع می‌باشد.

واژه‌های کلیدی:
فراMواد، گذردهی الکتریکی، نفوذپذیری مغناطیسی، ضریب شکست منفی، همگن

---

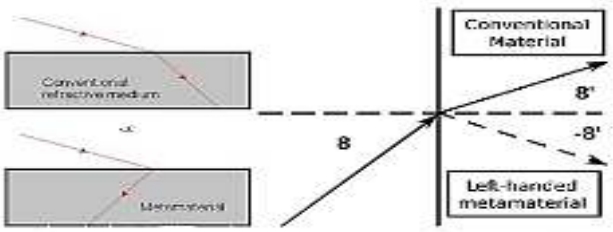
[۱] - استادیار دانشگاه پدافند هوایی خاتم الأنبیاء (ص) تهران، ایران
[۲] - دانشجوی کارشناسی‌ارشد دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران
* نویسنده مسئول: Email: j_khalilpour@yahoo.com

مقدمه

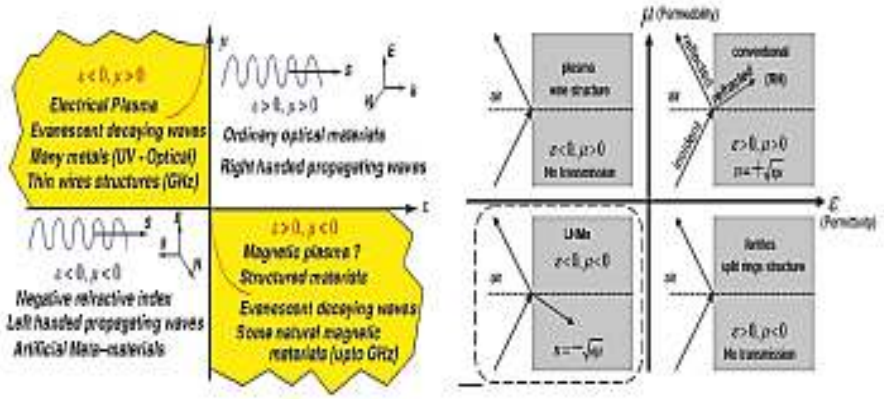
متامتریال[۱]از دو واژه "متا" و "متریال" تشکیل شده است، واژه متا برگرفته از واژه یونانی متا به معنای فرا و متریال به معنای مواد می‌باشد. فراماواد، مواد مرکبی هستند که دارای خواص نامتعارف الکترومغناطیسی در ساختار وجودی خود و دارای خاصیت ضریب شکست منفی نورمی‌باشند (شکل ۱). به این معنا که این مواد نور را در جهت مخالف مواد عادی منکسر می‌کنند. پاسخ مواد معمولی به امواج الکترومغناطیسی به مولکول‌ها و اتم‌های سازنده آن ماده بستگی دارد. در حالی که در فراماواد این پاسخ به ساختار تشکیل‌دهنده فراماواد بستگی دارد، تا به نوع اتم‌ها و مولکول‌های تشکیل‌دهنده آن بستگی داشته باشد. مواد با توجه به مثبت یا منفی‌بودن پارامترهای نفوذپذیری‌مغناطیسی وگذردهی‌الکتریکی به چهار دسته تقسیم‌بندی می-شوند (شکل ۲). دسته اول، موادی هستندکه هر دو پارامتر مثبت می‌باشند، که در دی‌الکتریک‌های شفاف معمولی اتفاق می‌افتد. دسته دوم، موادی که دارای نفوذپذیری مغناطیسی مثبت وگذردهی الکتریکی منفی می‌باشند، که معمولاً در پلاسماهای الکتریکی ظاهر می‌شوند. دسته سوم که از آن به عنوان مواد با ضریب شکست منفی یاد می‌شود، در آن هر دو پارامتر منفی می‌باشند (آیدین،۲۰۰۹:۷۹). در دسته آخر، نفوذپذیری مغناطیسی منفی بوده و گذردهی‌الکتریکی مثبت می‌باشد، که به عنوان مواد پلاسمای مغناطیسی شناخته می‌شوند. نوع مورد نظر در این مقاله دسته سوم می‌باشد. دستیابی به این مواد با استفاده از مواد موجود در طبیعت میسر نمی‌باشد، لذا برای دستیابی به این خواص باید از میکرو و نانو ساختارهای مصنوعی استفاده‌نمود. برخی از پدیده‌هایی که در این مواد مورد بررسی قرار گرفته و نتایجی برخلاف مواد معمولی نشان‌داده‌اند عبارتند از: پدیده داپلر،[۲] پدیده چرنکوف[۳]و... . فراماواد را بر حسب کاربرد به گروه‌های فراماواد مایکروویو،[۴] تراهرتز،[۵] فوتونیکی[۶] و ... تقسیم‌بندی می‌کنند.

---

۱. Meta material
۲. Doppler
3. Cherenkov
4. Microwave
۵. Terahertz
۶. Photonics



شکل ۱: (الف) نمایش شکست نور در مواد عادی، (ب) نمایش شکست منفی نور در فراماد.



شکل ۲: تقسیم‌بندی مواد بر اساس پارامترهای گذردهی‌الکتریکی و نفوذپذیری‌مغناطیسی.

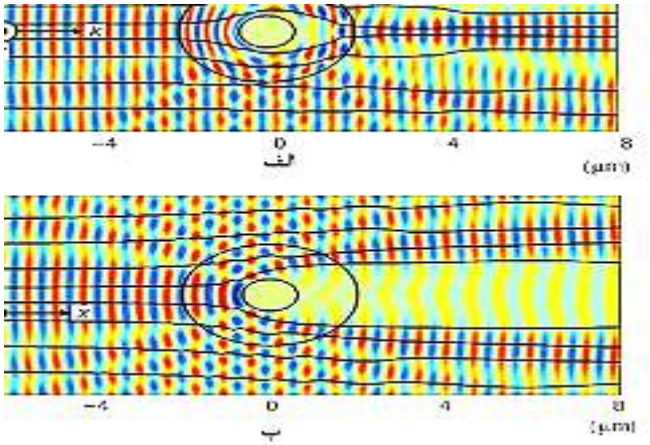
ساختار فراماد

فراماد، ساختارهای مرکب مصنوعی هستند که از لحاظ ساختار مؤثر الکترومغناطیسی همگن می‌باشند. یک ساختار مؤثر همگن، ساختاری است که میانگین اندازه سلول‌های شبکه آن، کوچک‌تر از طول موج انتشاری در آن باشد. چنانچه محیط شرط همگنی را داشته باشد می‌توان اطمینان داشت که پدیده شکست بر پدیده پراش[1] غالب شده و ماده از لحاظ الکترومغناطیسی یکپارچه خواهد بود، همچنین تحلیل موج انتشاری در آن با استفاده از روابط ماکروسکوپی امکان‌پذیر می‌باشد. با استفاده از پارامترهای گذردهی‌الکتریکی، نفوذپذیری مغناطیسی و ضریب‌شکست نوری می‌توان خواص ماکروسکوپی مواد را مورد مطالعه قرار داد. خاصیت گذردهی‌الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی مواد به صورت نسبی با گذردهی‌الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی هوا نسبت داده می‌شوند. بنا به گفته محققان، پرتوهای نوری که بر

1. Diffraction

فراماواد تابیده می‌شوند، به دور شیء گردیده و در طرف دیگر دوباره جمع شده، در نهایت دقیقاً در همان مسیر قبلی به راه خود ادامه می‌دهند (شکل ۳). همانطور که گفته شد مواد جدیدی که می‌توانند شیوه گشتن نور یا هر اشعه دیگر به دور اشیاء را تغییر دهند، می‌توانند روشی برای نامرئی‌کردن آن‌ها مهیا کنند. با پوشش اشیای مختلف با فراماواد می‌توان آن‌ها را از نور مرئی، نور مادون قرمز، مایکروویو (ریزموج) و شاید دستگاههای ردیاب صوتی پنهان کرد. این روش با توجه به خاصیت شکست نور مطرح شد. خاصیت شکست نور به این شکل است که امواج الکترومغناطیسی همواره سریعترین مسیر (و نه لزوماً کوتاه‌ترین مسیر) را برای حرکت خود انتخاب می‌کنند، روشی که در اینجا ایجاد شده است می‌تواند به کمک امواج الکترومغناطیس و صوت، در گریز نگارها نیز به کار گرفته شود. این تئوری از روش مورد استفاده در بمب افکن‌های مدرن استیلت[1](پنهانکار) که در آن با منعکس کردن امواج رادار از روی سطح خود، مانع دیده شدن می‌شوند، متفاوت است. در روش مورد نظر، شیء در پوسته‌ای از فراماواد قرار می‌گیرد و می‌تواند خطایی حسی مانند سراب را ایجاد کند. فراماواد برای ساختن بخش‌های الکترونیک بسیار سبک در هواپیماها، خودروها و همچنین عدسیهایی بسیار کارآمد استفاده می‌شوند. دیوید اسمیت[2]در دانشگاه دوک به همکاری جان پندری[3] از کالج سلطنتی لندن، به ایده استفاده از این مواد برای شکستن نور و تابش‌های الکترومغناطیسی دیگر دست یافتند. به گفته اسمیت: هر کسی که بخواهد چنین پوششی را بسازد باید در ابتدا تصمیم بگیرد که قصد دارد از دید کدام پرتوها پنهان بماند. این نامرئی بودن می‌تواند به شکل دیگری هم مورد استفاده قرار بگیرد، به این ترتیب که، شخص پنهان شده از طیف نور مرئی می‌تواند از ابزارهای ریزموجی، صوتی یا مادون قرمز برای دیدن بیرون استفاده‌کند.

1. Stealth
2. David Smith
3. John Pandri



شکل ۳: (الف) نمایش عبور نور از فراماده، (ب) نمایش عبور نور از ماده معمولی.

ویکتور وسلاگو[1] در سال ۱۹۶۷، معادلات ماکسول را بر اساس موادی فرضی که دارای نفوذپذیری و گذردهی همزمان منفی بودند، ارائه نمود. وی به صورت تئوری اثبات نمود که امواج صفحه‌ای در این مواد فرضی از ویژگی چپگرد پیروی می‌نمایند. وسلاگو همچنین نشان داد که نتیجه فرض فوق، ضریب‌شکست منفی و معکوس‌شدن اثر داپلر را به همراه دارد. این پدیده پنجره جدیدی را در زمینه انتشار نور گشوده و کاربردهای جدیدی مانند تصویربرداری زیر طول موج و کوچک‌سازی آنتن‌ها را پیشنهاد می‌کند. در دهه ۱۹۹۰، پندری توانست با آرایه‌ای از سیم‌های فلزی، گذردهی‌منفی بدست آورد و در ادامه مطالعات خود نفوذپذیری مغناطیسی منفی را از ساختارهای متناوب تشدید کننده‌های رینگ شکاف‌دار[2] بدست آورد. تقریباً تمام مواد از نظر اپتیکی دارای ضریب گذردهی و نفوذپذیری مثبت هستند. در عمل مواد شفاف دارای ضریب شکست حقیقی می‌باشد که از رابطه (۱-۱) تعیین می‌شود. (μ: ضریب نفوذپذیری مغناطیسی، ε: ضریب گذردهی الکتریکی و n: ضریب شکست حقیقی)

$$n = \pm\sqrt{\varepsilon\mu} \quad (۱\text{-}۱)$$

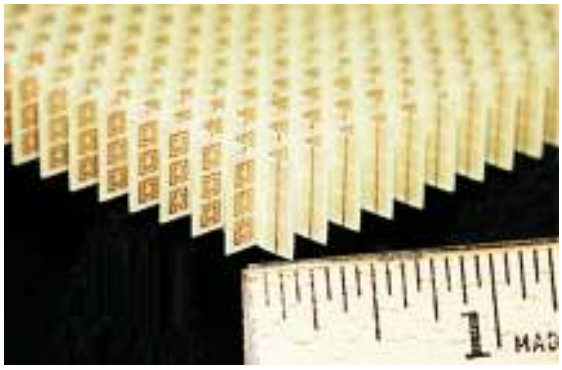
دانشمندان موفق به ساخت فراموا د کوانتومی شدند، که کاربردهای قابل توجهی در حوزه‌آشکارسازی فوتون‌ها دارد. دانشمندان برای ایجاد اثر انکسار منفی از تشدیدکننده‌های

---

[1] . Victor Veslago

[2] Split ring resonators

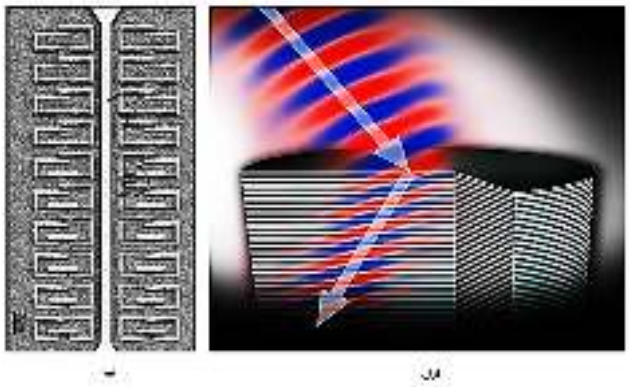
حلقه شکاف‌دار استفاده می‌کنند (شکل ۴). این ساختار از دو قطعه فلز غیر مغناطیسی c شکل و هم مرکز بهره می‌گیرد.



شکل ۴: نمایش تشدیدکننده‌های حلقه شکاف‌دار.

تشریح عملکرد دقیق این ساختار از اهداف این مقاله خارج است، اما به صورت کلی می‌توان گفت که شکل حلقه‌ها و محل قرارگیری شکاف‌ها، بر فرکانس تشدیدکننده‌ها (نور مرئی، اشعه مادون قرمز، امواج مایکروویو،..) تأثیر گذاشته و در نتیجه موجب انحراف اشعه‌ای که به این ساختار برخورد می‌کند، خواهد شد. مشکل اصلی فراماده مبتنی بر این ساختار، فرکانس کاری پایین آن‌هاست که همین امر ساخت لباس‌های نامرئی‌کننده را که بیشتر در موج‌های فرکانس بالایی مثل نور مرئی کاربرد دارند، با چالش مواجه ساخته است. محققان آلمانی با قرار دادن ۲۰ کوبیت (بیت کوانتومی) آلومینیوم در تشدیدکننده مایکرویوی توانستند مقدار بسیار اندکی ماده فراماده کوانتومی تولید کنند (شکل ۵-ب). با تابش امواج مایکروویو با یک فرکانس مشخص بر روی فراماده کوانتومی (شکل ۵-الف)، فوتون‌های تشکیل دهنده موج مایکروویو در تشدیدکننده برانگیخته می‌شوند، بعد از درهم‌کنش فوتون‌ها با ۲۰ کوبیت آلومینیم، در نهایت این فوتون‌ها با تغییر وضعیت از تشدیدکننده خارج می‌شوند که این تغییر حالت در قالب انحراف اشعه قابل مشاهده خواهد بود. محققان با بررسی تغییر حالت فوتون‌ها به نتیجه جالب توجهی رسیدند. هشت کوبیت به منظور اثرگذاری بر روی فوتون‌ها به هم جفت شدند و در حین انجام فرآیند، این گروه هشت‌تایی به گروه‌هایی چهارتایی تفکیک شدند. ما هنوز در مورد علت بروز این پدیده مطمئن نیستیم و کشف آن عمده‌ترین هدف تحقیقات آینده خواهد بود. از

میان طرحهای مختلفی که برای فراماد در نظر گرفته می‌شود ساختارهای فیشنت[۱] محتمل‌ترین طرح در ناحیه مرئی می‌باشد.



شکل ۵: (الف) نمایش تابش امواج مایکروویو بر روی فراماد کوانتومی، (ب) ساختار فراماد کوانتومی.

این دسته از فراماد متشکل از لایه‌هایی متناوب از جنس فلز و دی الکتریک بوده و دارای حفره‌های مستطیل شکلی در وسط سلول واحد خود می‌باشند. این ساختار را می‌توان متشکل از دو بخش مجزا دانست که سبب می‌شود تا بتوان گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی را به طور مجزا و جداگانه مهندسی نمود. مؤلفه اول در این ساختار که گذردهی الکتریکی منفی را موجب می‌شود متشکل از سیم‌های فلزی نازک بوده که در راستای میدان الکتریکی نور تابشی قرار گرفته‌اند و همانند فلزی با فرکانس پلاسمای کاهش یافته عمل خواهد کرد. مؤلفه دوم که منجر به ایجاد نفوذپذیری مغناطیسی منفی خواهد شد متشکل از نوارهای ضخیم فلزی بوده که در راستای میدان مغناطیسی نور تابشی قرار گرفته و با لایه‌های دی‌الکتریک از یکدیگر جدا شده‌اند. فراماد عموماً ترکیبی از هادیها که روی دی‌الکتریک چاپ می‌شوند، می‌باشند. پارامترهای پراکندگی این مواد در یک موجبر با خصوصیات معادل پلاسما مقایسه می‌شوند. طبق قوانین الکترومغناطیس اگر ضریب شکست ماده‌ای نزدیک به صفر شود پدیده فوق شکست رخ داده، امواج بازتابشی به جهت بردار سطح نزدیک شده، باعث متمرکز شدن میدانها شده و خصوصیات تشعشعی به طور مؤثری بهبود می‌یابد. بدین منظور فراماد با ضریب شکست نزدیک به صفر در فرکانس مورد نظر به صورت لایه فوقانی در بالای صفحه تشعشی آنتن قرار گرفته و سبب بهبود تشعشع آنتن خواهد شد. به طور کلی می‌توان فراماد را

---

۱ Fishnet

به دو دسته کلی تشدیدشونده و تشدیدنشونده تقسیم نمود که در نوع تشدیدشونده که موضوع مورد بحث ما در ادامه است، دوره تناوب در حدود ۱۰ برابر طول موج است ولی در دسته دوم، دوره تناوب بسیار کوچکتر از طول موج خواهد بود. اگر هر دوپارامترهای μ و ε مواد منفی باشند معادلات ماکسول را می‌توان به صورتی تغییر داد که H (شدت میدان مغناطیسی) و یا E (شدت میدان الکتریکی) منفی در نظر گرفته شود که به دلیل وابستگی این دو به بردار موج می‌توان در نظر گرفت که K (عدد موج) منفی است و این بدین معنی است که دیگر قانون دست-راست در اینجا صادق نیست و K در جهت منفی قرار دارد یا به عبارت ساده‌تر قانون دست-چپ برای آن صادق خواهد بود (چن،۲۰۰۹:۲۸۰). بنابراین روابط زیر برقرار می‌باشد.

$\nabla \times \vec{E} = -j\omega(-\mu)\vec{H}$	(۲-۱)
$\nabla \times \vec{H} = j\omega(-\varepsilon)\vec{E}$	(۳-۱)
$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu(-\vec{H})$	(۴-۱)
$\nabla \times (-\vec{H}) = j\omega\varepsilon\vec{E}$	(۵-۱)

با توجه به روابط (۱-۲) و (۱-۳)، به ترتیب روابط (۱-۴) و (۱-۵) حاصل می‌شود و نشان دهنده سیستم دست چپی می‌باشد.

برخلاف مواد طبیعی که خواص اپتیکی آن به ساختار اتم‌های تشکیل‌دهنده بستگی دارد، خواص اپتیکی یک فراماده از هندسه نانو سلول‌های خود یا همان اتم‌های مصنوعی مشتق می‌شود. با دستکاری هندسه این سلول‌ها می‌توان ضریب شکست را تنظیم کرده و ضریب شکست مثبت، منفی یا صفر به فراماده بخشید. یکی از مشکلات مواد مشابه با فراموا‌د، نیاز به تعامل با میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی نور می‌باشد. بسیاری از فراموا‌د طبیعی در برابر میدان مغناطیسی نوری با طول موج مرئی و مادون قرمز کدر هستند. در رویکرد قبلی برای تولید فراموا‌د، اتم‌های مصنوعی مرکب از دو جزء تولید شد، یک جزء در تعامل با میدان الکتریکی و جزء دیگر برای تعامل با میدان مغناطیسی بود. اشکال چنین رویکردی این است که هر جزء با رنگ‌های متفاوتی از نور در تعامل است و به طور معمول دشوار است که این دو جزء در طیف گسترده‌ای از طول موج همپوشانی داشته باشند. برای رفع این مشکل گروهی از محققان به سرپرستی دیون[۱] یک اتم تک‌جزئی با خصوصیاتی طراحی کردند تا به ماده اجازه دهد به بهترین شکل با هر میدان الکتریکی و مغناطیسی نور تعامل داشته باشد. گروه با

---

[۱] Dion

استفاده از ریاضیات پیچیده به شکل جدیدی از ماده رسیدند که دگرگونی اپتیکی[۱] نامیده می‌شود. آن‌ها با یک ساختار مسطح دو وجهی که دارای خواص اپتیکی مطلوب بود کارشان را آغاز کردند که البته نمی‌توانست اتم مناسبی برای فراموا‌د محسوب شود. سپس هنگام تهیه نقشه‌اتم درست شبیه یک طراح، شکل کروی را تبدیل به یک صفحه صاف کردند. سپس این ساختار نامتناهی را تا زده و ضمن حفظ خواص اپتیکی، آن را به یک شیء سه‌بعدی در مقیاس نانو تبدیل کردند. جسم تبدیل شده شبیه هلال ماه بوده و نوک آن باریک و در وسط پهن‌تر بود. فراماده جدید شامل اتم‌های هلالی شکل در مقیاس نانو بودند که در یک آرایه تناوبی مرتب شده بود. فراماده طراحی شده در طول موج حدود ۲۵۰ نانومتر و در نواحی چندگانه طیف مرئی و طیف نزدیک مادون قرمز دارای ضریب شکست منفی بود. محققان معتقدند با چند ترفند دیگر می‌توانند این فراماده را در سراسر طیف مرئی قابل استفاده سازند. فراموا‌د در ساخت دستگاه‌های نامرئی‌کننده و هایپرلنزها[۲] که تابع محدودیت‌های مواد معمولی نیستند، استفاده می‌شوند. نحوه رفتار یک ماده بر اساس خواص و ویژگی‌های اجزای تشکیل دهنده آن و نحوه چینش زیرواحدهای آن مشخص می‌شود. دکتر کریستین دلا[۳] و نادر انقطاع از دانشگاه پنسیلوانیا[۴] پیشنهاد می‌کنند برای ساخت فراموا‌د فقط از دو زیرواحد با خواص مخالف به نام بیت‌های فراموا‌د مثل صفر و یک که در کدهای دودویی هستند، استفاده کرد. این دو محقق از قطعات نقره و سیلیکا (در اندازه نانو) استفاده کرده‌اند که هرکدام در مواجهه با نور بسیار متفاوت عمل می‌کند: یکی از این مواد فلز است و دیگری عایق است. این دو محقق با استفاده از شبیه‌ساز کامپیوتری یک ساختار لایه‌ای ایجاد کرده‌اند که بایت‌های افزایش عملکرد و پیچیدگی را ترکیب می‌کند. در واقع وقتی این مواد دیجیتالی می‌شوند، ماده حاصل خواص منحصربه‌فرد خودش را دارد که کاملاً از خواص زیرواحدهای تشکیل دهنده‌اش جداست.

---

۱. Optical metamorphism
2Hyper lenses
۳. Dr. Christian Dela
۴. University of Pennsylvania

کاربردهای فراماواد

اکنون به نمونه‌هایی از کاربردهای فراماواد در مهندسی مایکروویو اشاره می‌کنیم

شنل نامرئی‌کننده فراماواد[۱]

فراماواد از دو یا چند آرایه منظم بسیار کوچک تشکیل شده است که از تمامی طول موجهای نوری که با آن در تقابل خواهد بود، کوچک‌تر است. این ساختار خاص و منظم داخلی همان چیزی است که به فراماواد خواصی غیر معمول می‌دهد. اکنون پژوهشگران موفق به ساخت ماده جدیدی از جنس فراماواد شده‌اند که بالاتر از سیاهی نام گرفته است. این ماده خواص نوری منحصر به فردی دارد و تقریباً می‌تواند تمام نوری که به سطح آن می‌تابد جذب کند. اوچنی ناریمانوف[۲]که ایده اولیه تولید این ماده را مطرح کرده است، دریافت که می‌توان با ایجاد ساختاری ویژه به فراماواد این امکان را داد که تقریباً تمامی پرتوهای الکترومغناطیس را در یک محدوده خاص جذب کند. شیء ساخته شده از این ماده می‌توانست در مقایسه با اجسام سیاه موجود در طبیعت که همیشه بخشی از نور را بر می‌گردانند کاملاً سیاه باشد. ساختار داخلی این ماده از آرایه‌هایی شامل نانو سیم‌های نقره به قطر ۳۵ نانومتر که در سطوح ۱ سانتیمتر مربعی از اکسید آلومینیوم به ضخامت ۵۱ میکرومتر جاسازی شده‌اند، تشکیل شده است. محققان موفق به ساخت ماده‌ای شده‌اند که می‌تواند حدود ۹۹ درصد از پرتوهای نور را حین برخورد جذب کند. کاربرد اصلی این ماده که به عنوان مرموزترین ماده شناخته شده است در ساخت تجهیزات جاسوسی که رادارها قابل به تشخیص آنها نیستند، خواهد بود(میری،۱۳۹۲:۹۷).

کاربرد فراماواد در طراحی شیلد و بهبود ضریب شیلدینگ[۳]

در بسیاری از کاربردها جلوگیری از رسیدن میدانهای الکترومغناطیسی به برخی ادوات یا جلوگیری از انتقال میدان به خارج از دستگاه و محیط اطراف و از بین بردن یا کاهش کوپلینگ بین تجهیزات کنار هم امری مطلوب است، و این کار با بکارگیری شیلدها و جاذب‌های الکترومغناطیسی انجام می‌گیرد. برای هر یک از این کاربردها موادی وجود دارند که به طور

---

۱. Meta material Invisibility Cloaks

۲. Uchni Narimanov

۳. Shielding coefficient

متداول از آنها استفاده می‌شود. اما با پیدایش فراماد و ویژگی‌های خاصی که این نوع مواد در انتشار امواج الکترومغناطیسی از خود نشان می‌دهند ساختارهای جدیدی با کارایی بهتر و ابعاد کوچکتر و سبکتر نسبت به ساختارهای متداول برای شیلدها و جاذب‌ها پدید آمدند. ساختارهای فراماد مختلفی در طراحی جاذب‌ها مورد استقاده قرار گرفته‌اند که یکی از این ساختارها، ساختاری بر مبنای باند گسست الکترومغناطیسی طراحی شده که چیدمان خاص این سلول‌ها در ساختار به خاصیت جذب بیشتری منجر می‌شود (احمدیان،۱۳۹۱:۸۹).

کاربرد فراماد در آنتن‌ها

در چند سال اخیر، تلاش‌هایی برای بهبود خصوصیات تشعشعی آنتن‌ها صورت گرفته است. با معرفی فراماد و بررسی ویژگی‌های منحصربه‌فرد این مواد، تحقیقات زیادی در مورد کاربرد این مواد در سیستم‌های تشعشعی صورت گرفته است. بهبود گین، جهت‌دهندگی و قدرت انتشار آنتن، از جمله مهمترین اهداف می‌باشد. تأثیرات ساختارهای متفاوت فراماد در بهبود گین آنتن دوقطبی مورد ارزیابی قرارگرفته است (میرزاپور،۲۰۰۸:۱۸۰). یکی از جالبترین ویژگی‌های این مواد این است که در برخی فرکانس‌ها ضرایب گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی صفر یا کوچکتر از صفر می‌شود. طبق قوانین الکترومغناطیسی می‌دانیم که یکی از ضرایب گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی در یک فرکانس مشخص صفر شود، منجر به صفر شدن ضریب شکست شده و در نتیجه باعث خواهد شد که جهت امواج خروجی از ماده، به بردار نرمال سطح نزدیکتر شود که از این خصیصه برای بهبود جهت‌دهی و گین آنتن، استفاده می‌شود. از سوی دیگر، چون این مواد قادر به پشتیبانی امواج وارونه هستند، می‌توانند سیستم تشعشعی راچندبانده کنند. همچنین‌جهت بررسی تأثیر فراماد در ساختارهای الکترومغناطیس، روش‌های بکارگیری آن در آنتن‌ها مورد بررسی قرار گرفته که نتایج بدست‌آمده نشان دهنده افزایش پارامترهایی مانند سمت‌گرایی، توان تشعشعی، پهنای باند و در نهایت کوچک‌سازی در آنتن‌های مرجع می‌باشد (اریبی،۱۳۸۷:۴۹).

کاربرد فراماد در ساختارهای آنتن‌های مایمو[1]

[1] Multiple Input-Multiple Output(MIMO)

مایمو که عبارت اختصاری چند ورودی – چند خروجی می‌باشد یک فناوری انتشار امواج (آنتن) برای سیستم‌های مخابراتی بیسیم است. بدین صورت که در هر دو طرف فرستنده و گیرنده از چند آنتن استفاده می‌شود. سیگنال‌های ارسالی در انتهای مدار مخابراتی با هم ترکیب می‌شوند تا خطا به حداقل رسیده، سرعت انتقال اطلاعات به بیشینه افزایش پیدا کند. فناوری مایمو با افزودن چشمگیر گذردهی داده‌ها و برد لینک مخابراتی آن هم بدون نیاز به پهنای باند با توان ارسالی اضافی جایگاه ویژه‌ای در مخابرات بیسیم یافته است. دستیابی مایمو به این امر بوسیله بازدهی طیفی بالاتر (تعداد بیت‌های بیشتر در هر ثانیه در هر هرتز از پهنای باند) و قابلیت اطمینان ارتباط است. در این بین روش‌های بسیاری برای پیاده سازی این سیستم و بهره‌مندی از مزایای آن پیشنهاد شده است. در سالهای اخیر تحقیقات بسیاری در مورد پیاده‌سازی‌سیستم‌های‌مایمو‌با‌استفاده‌از ساختارهای فراموادی شده‌است (بحری،۱۳۹۳:۵۵).

کاربرد فراماواد در زیر لایه آنتن میکرواستریپ پچ مثلثی با هندسه فراکتالی[۱]

برای کوچک‌کردن اندازه آنتن روش‌های مختلفی مانند افزودن بار دی‌الکتریک (یونگ،۲۰۱۱:۵۷۵) و ساختارهای مارپیچی (لیدنگ،۲۰۱۲:۸۰) استفاده شده است و برای کاهش سطح فیزیکی آنتن می‌توان از فراکتالی کردن استفاده کرد. واژه فراکتال اولین بار توسط مندلبروت[۲]برای توصیف شکل‌های پیچیده که خاصیت خود تشابهی ذاتی در ساختار هندسی‌شان دارند ارائه شد. استفاده از هندسه فراکتالی در زمینه‌های مختلف مهندسی توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. یکی از این زمینه‌ها طراحی آنتن است. برخی ساختار فراکتالی توانسته‌اند ابعاد آنتن را به مقدار چشمگیری کوچک کنند (الشربینی،۲۰۰۶:۹۹۳). این بدان معنی است که ابعاد الکتریکی معادل آنتن از ابعاد فیزیکی آن بزرگ‌تر است. برخی از این ساختارها امکان دسترسی به چند باند فرکانسی را فراهم می‌کنند. ساختارهای فراکتالی شکل، طول یا محیط را بر روی بخش‌های داخلی یا ساختارهای خارجی افزایش می‌دهند و با این کار مسیر جریان الکتریکی سطحی را افزایش داده و در نتیجه فرکانس رزونانس را کاهش می‌دهند. روش مورد استفاده در این کار ایجاد فراکتال‌هایی به شکل مثلث سیرپینسکی[۳] برروی پچ مثلثی است، پس از آن سعی شده با

---

۱. Fractal geometry

۲. Mandelbrot

۳. Syrpinsky Triangle

به کار بردن زیر لایه فراماد با ساختار باند ممنوعه کاهش فرکانس، رزونانس بیشتری را برروی آنتن بدست آورد (سهندآبادی،۲:۱۳۹۲).

کاربرد فراماد در کوچک‌سازی و ایجاد مد تشعشعی اضافی و افزایش گین تشعشعی آنتن‌های میکرواستریپ

در آنتن‌های میکرواستریپی مستطیلی که زیر لایه‌های آن‌ها با فراماد با نفوذپذیری منفی بار می‌شود، می‌توان به مد تابشی دست یافت که طول موج در فرکانس تشدید بسیار پایین‌تر از ابعاد آنتن باشد. بر اساس روش بیان شده یک آنتن با زیر لایه فرامادی طراحی شده که ابعاد آن به اندازه ۷۷درصد کاهش یافته است و بر اساس روابط میدان در زیر لایه آنتن‌های میکرواستریپ مستطیلی که با فراماد بارگذاری شده‌اند الگوریتمی استفاده شده که بر اساس آن می‌توان مد تشعشعی اضافی در این نوع آنتن‌ها ایجاد کرد. همچنین با بکار بردن نوع خاصی از فراماد در زیر لایه آنتن حلقه‌ای چهار بانده، می‌توان بهره تشعشعی این آنتن را افزایش داد (بذرکار، ۵۴:۱۳۹۰).

کاربرد فراماد در آنتن‌های مدارچاپی و افزایش بهره آنتن‌ها

آنتن‌های مدارچاپی با بهره‌های بالا کاربردهای وسیعی در سیستم‌های نظامی و تجاری دارند. ولی بهره این نوع آنتن‌ها محدود به ۶ الی ۷ دسیبل می‌باشد. با استفاده از ساختارهای فراماد بهره این آنتن‌ها افزایش می‌یابد. با بررسی بر روی یک ساختار ساده که شامل دو حلقه فلزی چاپ شده در دو طرف یک زیر لایه دی‌الکتریک با ساختار صفحه‌ای با ضریب شکست صفر استفاده شده و برای فشرده‌سازی بیشتر بعد از تحلیل روابط فیزیک برای بدست آوردن ساختاری با پلاسمایی پایین‌تر با سطح زیر لایه ثابت باید از حلقه‌هایی با طول بیشتر استفاده کرد که از ساختارهایی همچون فراکتال هیلبرت[1]استفاده می‌شود. با بررسی تأثیر ساختار ذکر شده بر روی الگوهای تشعشعی آنتن‌های مدارچاپی و تنها با استفاده از یک سلول واحد فراماد بر روی آن در فاصله نصف طول موج نتیجه می‌شود که یک سلول واحد به تنهایی می‌تواند بهره آنتن را به میزان حدود ۵ دسیبل افزایش دهد و با ساخت یک لنز کامل[2]از سلول‌های واحد

---

1 Hilbert Fractal

2 Perfect lens

فرامواد و قرارگیری آن بر روی آنتن بهره آنتن تا حدود از ۶ تا ۱۶ دسیبل افزایش دهد (حاجی‌زاده،۱۳۹۱:۷۱).

کاربرد فراماد در رولایه آنتن پچ میکرواستریپ

برای افزایش بهره و پهنای باند آنتن‌های پچ میکرواستریپ می‌توان از فراماد به عنوان رولایه استفاده کرد. یک ساختار تشدیدی جدید فراماده معرفی‌شده است که در آن فراماده به فرم امگای تغییر شکل یافته می‌باشد. نشان داده‌شده است که حول فرکانس تشدید در فراماده معرفی‌شده، ضریب نفوذ مغناطیسی و ضریب گذردهی الکتریکی منفی می‌باشند. فراماده حاصل، از انتشار امواج سطحی ایجادشده، بر روی آنتن پچ جلوگیری کرده است و باعث بهبود پارامترهای تشعشعی آنتن می‌شود. برای بررسی عملکرد رو لایه، ابتدا یک آنتن پچ مستطیلی در باند C طراحی شده‌است و سپس با بکارگیری فراماده معرفی شده به عنوان رولایه، بهره آنتن در حدود ۱۱۶درصد و پهنای باند آنتن در حدود ۹۰ درصد افزایش داده شده است. آنتن پچ و فراماده مورد نظر ساخته شده و گین و تلفات بازگشتی آنتن در حضور و عدم حضور رولایه، اندازه‌گیری عملی شده‌است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری توافق خوبی با نتایج شبیه‌سازی دارد. (خلیل‌پور وشریفی، ۱۲:۱۳۸۴)

کاربرد فراماد در فشرده‌سازی ادوات مایکروویو نظیر فیلترها و سنسورها

سنتز فراماد با استفاده تشدیدکننده‌های حلقه شکاف‌دار صورت می‌گیرد. در این خصوص نکته کلیدی اندازه بسیار کوچک این تشدیدکننده‌ها در قیاس با طول موج مورد استفاده است. همچنین فشرده بودن این تشدیدکننده‌ها همراه با مفاهیم الهام گرفته شده ازخواص فراماد می‌تواند در طراحی مدارهای صفحه‌ای فشرده مورد استفاده قرار گیرد. در این راستا با توجه به نیاز روز افزون به فشرده‌سازی مدارهای صفحه‌ای مایکروویوی، موج میلیمتری و تراهرتز، خصوصاً در ادواتالکترونیکی و مخابراتی سیار، با استفاده از فراماد و کاربرد آن در فشرده‌سازی مدارات مایکرویوو فیلترها نمایان گشته است (اورعی،۳۵:۱۳۹۱).

کاربرد فراماد در طراحی خطوط انتقال مایکروو

با توجه به اینکه فراماد یک ساختار مصنوعی و همگن هستند، که خواص غیرعادی الکترومغناطیسی از خود نشان می‌دهند، و همچنین مواد دست چپی که دارای ضریب گذردهی الکتریکی و نفوذ پذیری مغناطیسی منفی هستند، اما مواد دست چپی خالص را نمی‌توان

ایجادکرد، زیرا به دلیل وجود عناصر پارازیتیک در فرکانس‌های بالا، همواره ترکیبی از مواد دست‌راستی[۱](که دارای ضرایب گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی مثبت هستند) و دست‌چپی[۲]وجود دارد، و به این نکته باید اشاره نمود که فرامواد فقط به این مواد محدود نمی‌شود. خط انتقال اینتردیجیتال[۳]بر اساس مفاهیم خط انتقال فرامواد دست چپی و دست راستی معرفی شده است، که معایب و مشکلات خط انتقال را ندارد. با کنار هم قرار دادن و سری کردن خازنهای اینتردیجیتال می‌توان یک خط انتقال اینتردیجیتال ایجاد کرد. به ازای فرکانس‌های بیشتر از فرکانس تشدید سری ساختار، ثابت انتشار این خط انتقال حقیقی و مثبت خواهد شد. بنابراین خط انتقال عملکردی مشابه خط انتقال معمولی دارد، اما ثابت انتشار و در نتیجه امپدانس مشخصه آنها تابعی از فرکانس می‌باشد، و از این نظر با خط انتقال معمولی تفاوت دارد (کشاورز،۱۳۸۹:۴۴).

کاربرد فرامواد در طراحی و ساخت فیلتر میان‌نگذر موجبری

در یک کاربرد جدید یک ورقه نازک از تشدیدکننده‌های حلقوی S شکل برای پرکردن یک موجبر مستطیلی به عنوان یک فیلتر میان‌نگذر موجبری که پهنای باند و فرکانس قطع آن قابل تنظیم است، استفاده شده‌است. شبیه‌سازی و اندازه‌گیری پارامترهای ماتریس پراکندگی این ساختار ارائه شده‌است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که فرکانس قطع و پهنای باند، باند توقف فیلتر بوسیله تغییرات خواص زیرلایه فراماده (ضریب گذردهی‌الکتریکی و ضخامت) و موقعیت قرارگیری آن درون موجبر می‌تواند کنترل شود. همچنین نتایج نشان‌داده‌است که تغییر قسمت حقیقی گذردهی نسبی زیرلایه فراماده از ۱ تا ۶، در حالی که ضخامت فیزیکی ثابت نگه‌داشته‌شود (۰,۵۸ میلیمتر)، فرکانس قطع از ۱۰,۶ به ۶,۹ گیگاهرتز جابه‌جا می‌شود. از طرف دیگر هنگامی که ضخامت فیزیکی زیرلایه فراماده از ۰,۵۰۸ میلیمتر تا ۴ میلیمتر تغییرکند، در حالی که گذردهی نسبی ثابت نگه‌داشته شود، فرکانس قطع فیلتر از ۸,۸ تا ۵,۹ گیگاهرتز کاهش می‌یابد. دیده‌شده است که پهنای باند توقف فیلتر از حدود ۴,۷ گیگاهرتز تا

---

۱ Right Handed (RH)

۲ Left Handed (LH)

۳ Inter digital

حدود چند مگاهرتز می‌تواند بوسیله افزایش فاصله ورقه از محور مرکزی موجبر کاهش پیدا کند (خلیل‌پور و حکاک،۵۸۷:۱۳۸۸).

کاربرد فراماد در اتصال T صفحه E موجبری با ساختار دوبانده قابل تنظیم

در کاربردی جدید، یک اتصال T صفحه E موجبری باند X، با استفاده از یک ورقه از تشدیدکننده‌های حلقوی S شکل در هر بازوی اتصال، به عنوان یک تقسیم‌کننده توان دو بانده بکار گرفته شده است. نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری و شبیه‌سازی عددی ساختار ارائه شده‌است. نتایج نشان داده‌است که این ساختار در باند فرکانسی عریض زیر فرکانس قطع اتصال T موجبری خالی (بدون حضور فراماده) و با حداقل تلفات عبوری، می‌تواند استفاده شود. همچنین نشان داده شده است که رنج فرکانسی هر یک از دو باند عبور، بوسیله تغییرات خواص زیر لایه فراماده (ضریب گذردهی الکتریکی، ضخامت و موقعیت قرارگیری داخل موجبرها) قابل تنظیم است (خلیل‌پور و رادمنش،۱۵:۱۳۸۹).

کاربرد فراماد در پدیده تونل‌زنی در موجبر

در کاربردی جدید، یک ورقه از تشدیدکننده‌های حلقوی S شکل به فرم از یک فراماده تک قطبی غیر همسانگرد با ضریب نفوذ مؤثر مغناطیسی منفی برای پرکردن موجبر مستطیلی استفاده می‌شود. تئوری و نتایج آزمایش‌ها نشان‌داده‌است که فرکانس قطع موجبر کاهش یافته است. به عبارت دیگر، زیر فرکانس قطع موجبر خالی با حداقل تلفات عبوری، می‌توان از موجبر برای انتشار مود غالب استفاده کرد. از طرف دیگر این ساختار به عنوان فیلتر میان‌نگذر با پهنای باند قابل تنظیم، استفاده می‌شود. پهنای باند، باند توقف می‌تواند از چند مگاهرتز تا چند گیگاهرتز متغیر باشد. عرض باند با افزایش فاصله ورقه از محور مرکزی موجبر، کاهش می‌یابد (خلیل‌پور و حکاک، ۱۴:۱۳۸۷).

کاربرد فراماد در بافرهای شبکه‌های مخابرات فیبرنوری

با ورود فیبرنوری به شبکه‌های مخابراتی و ایجاد شبکه‌های مخابرات فیبرنوری جهت بهبود عملکرد شبکه و افزایش قابلیت‌های آن از جمله افزایش پهنای باند، سرعت عملکرد سیستم و کاهش تلفات، تجهیزات الکترونیکی مورد استفاده به تدریج جای خود را به تجهیزات تمام نوری می‌دهند. یکی از المان‌های اصلی در این شبکه‌ها که در پردازش اطلاعات بکار می‌رود بافرها می‌باشند. هنگامیکه چند بسته دیتا از منابع مختلف به طور همزمان به یک گره می‌رسند و به

یک مقصد نهایی مشترک ارسال می‌شوند، جهت جلوگیری از تصادم و از بین رفتن اطلاعات یعنی برای جمع کردن بیتهای دیتا عمل بافرکردن انجام می‌شود. از طرف دیگر فراموادد دارای کاربردهای منحصر به فردی می‌باشند، که یکی از این کاربردها استفاده از این مواد به عنوان ماده مورد استفاده در هسته موجبرهای نوری می‌باشد. (شاه‌ملکی،۱۳۹۰:۶۶).

یافته‌ها

برطبق مبانی نظری و مفاهیم و تحلیلی که از فراموادد صورت گرفت، فراموادد دارای ویژگیها و کاربردهای زیر می‌باشند.

۱. دسته‌ای از مواد مصنوعی ساخت انسان می‌باشند، که از ترکیب آرایه‌ای از میله‌ها و حلقه‌های فلزی بوجود می‌آیند.

۲. دارای خواص نامتعارف الکترومغناطیسی در ساختار وجودی خود و دارای خاصیت ضریب شکست منفی نور می‌باشند.

۳. از لحاظ ساختار مؤثر الکترومغناطیسی همگن می‌باشند. پاسخ فراموادد به امواج الکترومغناطیسی به مولکول‌ها و اتم‌های سازنده آن ماده بستگی دارد.

۴. فراموادد با توجه به مثبت یا منفی بودن پارامترهای نفوذپذیری وگذردهی الکتریکی به چهار دسته تقسیم‌بندی می‌شوند. دسته اول، موادی هستند که هر دو پارامتر مثبت می‌باشند، که در دی‌الکتریک‌های شفاف معمولی اتفاق می‌افتد. دسته دوم، موادی که دارای نفوذپذیری مغناطیسی مثبت و گذردهی الکتریکی منفی می‌باشند، که معمولاً در پلاسماهای الکتریکی ظاهر می‌شوند. دسته سوم که از آن به‌عنوان مواد با ضریب شکست منفی یاد می‌شود، در آن هر دو پارامتر منفی می‌باشند. در دسته آخر، نفوذپذیری مغناطیسی منفی بوده و گذردهی الکتریکی مثبت می‌باشد، که به عنوان مواد پلاسمای مغناطیسی شناخته می‌شوند. دستیابی به این مواد با استفاده از مواد موجود در طبیعت میسر نمی‌باشد، لذا برای دستیابی به این خواص باید از میکرو و نانو ساختارهای مصنوعی استفاده‌نمود.

۵. پرتوهای نوری که بر فراموادد تابیده می‌شوند، به دور شیء گردیده و در طرف دیگر دوباره جمع شده، در نهایت دقیقاً در همان مسیر قبلی به راه خود ادامه می‌دهند.

با پوشش اشیای مختلف با فراموادد می‌توان آن‌ها را از نور مرئی، نور مادون قرمز، مایکروویو (ریزموج) و شاید دستگاههای ردیاب صوتی پنهان کرد.

۶. خواص اپتیکی یک فراماده از هندسه نانو سلول‌های خود یا همان اتم‌های مصنوعی مشتق می‌شود. با دستکاری هندسه این سلول‌ها می‌توان ضریب‌شکست را تنظیم کرده و ضریب‌شکست مثبت، منفی یا صفر به فراماده بخشید.

۷. خواص جالب توجه فراموا‌د، باعث بکارگیری گسترده آن‌ها در زمینه‌های مختلف مایکروویو، آنتن‌های هوشمند، لنزها و ...شده‌است.

از جنبه نظامی، نیز می‌توان از فراموا‌د درموارد زیر استفاده کرد.

- می‌توان در نامرئی‌سازی پرنده‌های خودی نظیر پهپاد، موشک و یا به عبارتی دیگر در ساخت شنل نامرئی‌کننده استفاده‌کرد.
- در طراحی شیلد وبهبود ضریب شیلدینگ برای ایمنی سیستم‌های نظامی و اتاق‌های جنگ با استفاده از فراموا‌د استفاده شده‌است.
- بکارگیری فراموا‌د در آنتن‌ها مورد بررسی قرارگرفته‌است، که نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده افزایش پارامترهایی مانند سمت‌گرایی، توان تشعشعی، پهنای باند و در نهایت کوچک‌سازی و چند باندی‌کردن در آنتن‌های مرجع می‌باشد.
- کاربرد فراموا‌د باعث فشرده‌سازی ادوات مایکروویو نظیر فیلترها و سنسورها شده‌است.
- استفاده از فراموا‌د در بافرهای شبکه‌های مخابرات فیبرنوری باعث جلوگیری از تصادم و از بین رفتن اطلاعات می‌شود.

نتیجه گیری

در این مقاله به تشریح ساختار و خواص نامتعارف فراموا‌د در مواجهه با امواج الکترومغناطیسی پرداخته شد. این مواد دارای ضرایب گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی صفر و یا کوچکتر از صفر در فرکانسهای خاصی می‌باشند. تأثیر استفاده از فراموا‌د در استتارهای مدرن با پوشش فرامواد‌ی بررسی شد. از مباحث مطرح شده نتیجه گرفته می‌شود که درکاربردهای مهم نظامی، استفاده از فراموا‌د در نامرئی‌سازی پرنده‌های خودی نظیر پهپاد و موشک مؤثر می‌باشد. همچنین در طراحی شیلد و بهبود ضریب شیلدینگ برای ایمنی سیستم‌های نظامی و اتاق‌های جنگ، می‌توان از فراموا‌د استفاده کرد. این مواد برای بهبود و ارتقای خواص تشعشعی آنتن‌ها (کوچک سازی، ایجاد مد تشعشعی اضافی، افزایش جهت‌دهی و گین)، و فشرده‌سازی ادوات مایکروویو (فیلترها و سنسورها) بکار گرفته شده در تجهیزات نظامی نیز مناسب می‌باشند.

منابع

- امیری، امیدرضا (۱۳۹۲)، تحلیل و شبیه‌سازی آنتن‌های تشدیدکننده دی‌الکتریک با ساختارهای متامتریال و بهبود پارامترهای آن، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه شیراز
- احمدیان، راحله (۱۳۹۱)، طراحی شیلد متامتریال و شبیه‌سازی آن به منظور یهبود ضریب شیلدینگ، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه بین‌المللی امام‌خمینی
- اریبی، میرتوحید (۱۳۸۷)، بررسی کاربرد مواد متامتریال در آنتن‌ها، تهران، سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب
- بحری، علی (۱۳۹۳)، بررسی، طراحی و شبیه‌سازی آنتن‌های MIMO مبتنی بر ساختارهای متامتریال، پایان‌نامه کارشناسی، دانشگاه زنجان
- سهندآبادی، ساحره (۱۳۹۲)، آنتن مثلثی سیرپینسکی بر روی زیرلایه متامتریال باند ممنوعه قارچی، تهران موسسه آموزش‌عالی خاوران
- بذرکار، امیر (۱۳۹۰)، طراحی و تحلیل آنتن‌های میکرواستریپ بر روی زیرلایه‌های متامتریال، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه صنعتی شیراز
- حاجی‌زاده، پرویز (۱۳۹۱)، افزایش بهره آنتن‌های مدارچاپی با استفاده از متامتریال‌ها، پایان‌نامه دوره کارشناسی‌ارشد، دانشگاه شاهد
- اورعی، محمدرضا (۱۳۹۱)، بررسی خواص نوری فراماده و کاربردهای آن در فناوری‌های نوین نوری، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه اصفهان
- کشاورز، رسول (۱۳۸۹)، متامتریال و کاربرد آن در طراحی مدارهای مایکروویو، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان
- شاه‌ملکی، روجیار (۱۳۹۰)، طراحی بافر تمام نوری با متامتریال، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه تبریز
- خلیل‌پور و حکاک، (۱۳۸۷)، پدیده تونل‌رنی در موجبر با استفاده از فراماده، ژورنال الکترومغناطیس،۲۳، ۱۷۷۲-۱۷۶۳
- خلیل‌پور و شریفی، (۱۳۸۴)، بکارگیری فراماده بهبودیافته به عنوان رولایه آنتن پچ میکرواستریپ، انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران،۲،۲
- خلیل‌پور و حکاک، (۱۳۸۸)، باند توقف قابل تنظیم فیلتر موجبری با استفاده از تشدیدکننده‌های حلقوی S شکل، ژورنال الکترومغناطیس،۲۴، ۵۹۶-۵۸۷
- خلیل‌پور و رادمنش، (۱۳۸۹۸)، اتصال T صفحه E موجبری دو بانده قابل تنظیم با استفاده از تشدیدکننده‌های حلقوی S شکل، انجمن مهندسین برق والکترونیک ایران

- Z. Li, K. Aydin, and E. Ozbay, (2009)" Determination of the effective constitutive parameters of bi anisotropic meta materials from reflection and transmission coefficients," Phys. Rev. E 79, 026610, 2009.
- Chen, H., L. Ran, J. Huangfu, X. Zhang, K. Chen, T. M. Grzegorczyk, and J. A. Kong, "Left-handed meta materials composed of only S-shaped resonators,"
- Mirzapour, B. Hassani, H.R. (2008)"Size reduction and band width enhancement of snowflack fractal antenna", IET Microwaves, Antennas & Propagation, Volume2, Issue2, 2008, p.180-187.
- Young, M.B, (2011) "Reducing the size of helical antennas by means of dielectric loading," Pulsed Power Conference, IEEE, 2011, p. 575-579.
- Li Deng, Shu-Fang Li, Ka-Leung Lau, and Quan Xue, (2012) "Vertical Meandering Approach for Antenna Size Reduction," International Journal of Antennas and Propagation, vol. 2012.
- F. Yang, V. Demir, D.A. Elsherbeini, and A. Z. Elsherbeini (2006) "Enhancment of Printed Dipole Antennas Characteristics Using Semi-EBG Ground Plane", Journal of Electromagnetic Waves and Applications, Vol.20, NO. 8, 2006, pp. 993-1006.