بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

طراحی و شبیه سازی سلول واحد فرامواد در باند تراهرتز و بازیابی پارامترهای الکترومغناطیسی

امیر علیزاده، مجید ناظری و احمد ساجدی

گروه لیزر و فوتونیک دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران
amiralizadeh@grad.kashanu.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک سلول واحد فرامواد در باند فرکانسی تراهرتز طراحی و شبیه سازی شده است و پارامترهای الکترومغناطیسی آن از قبیل گذردهی الکتریکی، نفوذپذیری مغناطیسی، ضریب شکست و امپدانس به صورت همزمان بازیابی می‌شود. استفاده از ساختار دوره ای فرامواد در آنتن های نوررسانشی تراهرتز به دلیل تاثیرگذاری روی پارامترهای الکترومغناطیسی آنتن در برخورد موج الکترومغناطیسی با آنتن، می تواند منجر به افزایش توان خروجی و بهبود جهت دهی آنتن شود. ساختار سلول واحد فرامواد از دو رینگ دایره ای شکافدار و میله که بر روی زیرلایه ای از ماده نیمه رسانا قرار گرفته اند، تشکیل شده است.

کلید واژه: سلول واحد، رینگ حلقه ای شکافدار، نوررسانشی، فرامواد.

Design and Simulation of Metamaterial Unit Cell in Terahertz Band and Electromagnetic Parameters Retrieval

Amir Alizadeh, Majid Nazeri and Ahmad Sajedi

Department of Laser & Photonics, Faculty of Physics, University of Kashan, Kashan, Iran

Abstract- In this paper, a metamaterial unit cell in terahertz band is designed and simulated and it's electromagnetic parameters such as permittivity, permeability, impedance and refractive index is retrieved. Use of the periodic structure of the metamaterial in terahertz photoconductive antennas due to the influence on electromagnetic parameters of antenna in contact with electromagnetic waves, can improve output power and directivity of antenna. Unit cell structure is composed of two split circle rings and wire placed on a substrate of semiconductor material.

Keywords: Unit cell, Split circle ring, Photoconductive, Metamaterial.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱ -مقدمه

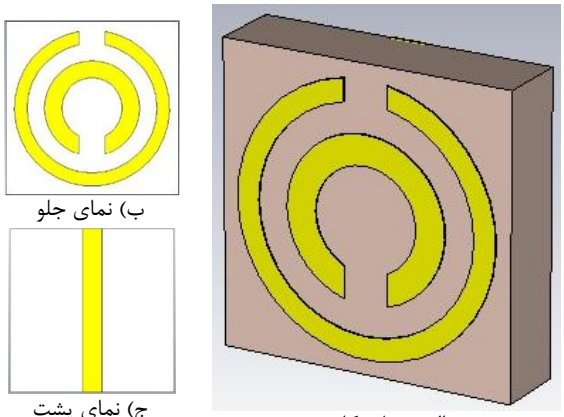
فرامـواد بـه مـوادی گفتـه مـی شـوند کـه در ماهیـت ساختاری خود، دارای خـواص الکترومغناطیسـی نامتعـارف هستند. از منظر الکترومغناطیسی مواد موجود در طبیعـت به دو دسته طبیعی و فرامـواد تقسـیم بنـدی مـی شـوند. فرامواد به طور مستقیم و عادی در طبیعت وجود نداشته و بایستی به صورت مصنوعی و مهندسی شده ساخته شـوند. فرامواد برای اولین بار در سال ۱۹۶۸ با مطالعـه روی مـاده ای که به طور همزمان دارای $\varepsilon, \mu < 0$ است، معرفی شد. ساختارهای فرامـوادی، به دلیل آنکه قـادر بـه کنتـرل فـاز، دامنه و قطبش امواج فرودی هسـتند، بسـیار مـورد توجـه قرار گرفته اند [۱]. در سال‌هـای اخیـر، اسـتفاده و کـاربرد فرامواد در انواع مختلف آنتن ها، سنسورها و فیلترها بسیار گسترش یافته و مورد توجه قرار گرفته است، که در همین راسـتا طـرح اسـتفاده از فرامـواد در زیرلایـه آنـتن هـای نوررسانشی تراهرتز را برای افزایش توان خروجـی و بهبـود جهتمندی آنتن پیشـنهاد دادیـم [۲]. فرامـواد متشـکل از سلول های واحد در ابعاد کوچکتر از طول موج نور فـرودی هستند، از آنجا که ضرب خارجی میدان هـای الکتریکـی و مغناطیسی در این مواد از قانون دست چپ پیروی می‌کند، این مواد را اصطلاحا "مواد چپگرد" نیز می نامند. در سـال ۱۹۹۹ با استفاده از میله های فلزی، توانستند مـاده ای بـا ضـریب عبـوردهی الکتریکـی منفـی را بسـازند. عـلاوه بـر عبـوردهی الکتریکـی سـاخت مـوادی بـا نفوذپـذیری مغناطیسی منفی نیز ضروری بود. این مهم، بـا اسـتفاده از آرایه هایی از تشدیدگرهای حلقه ای شکافدار، در محـدوده فرکانسی مایکروویو و تراهرتز بدست آمد [۳]. خصوصـیات الکترومغناطیسی سـاختارهای همگـن بـا اسـتفاده از حـل معادلات ماکسول و مشخص شدن ارتباط بین میدان هـای الکتریکی و مغناطیسی محلی، با جریان و چگالی بار تعیین می گردد. گـذردهی الکتریکـی و نفوذپـذیری مغناطیسـی، نشان دهنده پاسخ ماکروسکوپیک محیط همگن به میـدان های محلی اعمال شده است. مطابق قانون فـارادی، اعمـال میدان مغناطیسی بـه حلقـه فلـزی، سـبب القـای جریـان الکتریکی در آن می شود، حلقه فلـزی معـادل یـک سـلف است، بر اسـاس قـانون لنـز، حلقـه بـا میـدان مغناطیسـی اعمالی، مخالفت می کند، در نتیجه خاصیت دیامغنـاطیس که همان کاهش نفوذپذیری است، از خود نشان می دهـد. در حالت عادی این کاهش نفوذپذیری بسیار نـاچیز اسـت، اما در تشدیدگر حلقه ای شکافدار، به دلیل وجود خاصـیت خازنی بین دو حلقه، ایـن کـاهش نفوذپـذیری بـه صـورت تشدید (حاصل از تشدید سلف و خازن) می‌تواند رخ دهد و مقدار نفوذپذیری مغناطیسی را منفی کند [۴]. فرامـواد را می‌توان از دو جنبه میکروسکوپیک و ماکروسکوپیک مـورد بررسی قرار داد، در بررسی میکروسـکوپیک، سـلول واحـد سازنده فرامـواد کـه از میلـه و حلقـه تشـکیل شـده اسـت تحلیل می شـود و در بررسـی ماکروسـکوپیک اثـر نهـایی سلول‌هـا در کنـار یکـدیگر، از نظـر گـذردهی الکتریکـی و نفوذپذیری مغناطیسی مورد بررسی قرار می گیرد. در سال ۲۰۰۵ سلول های واحد فرامـوادی در ابعـاد میلیمتـر و در سه حالت مختلف در محدوده فرکانسـی گیگـاهرتز، مـورد تحلیل و شبیه سازی قرار گرفتنـد [۵]. در ایـن مقالـه، در ادامـه کـار فـوق، یـک سـلول واحـد فرامـوادی در ابعـاد میکرومتر و در بازه فرکانسی تراهرتز طراحی و شبیه سازی شـده و پارامترهـای الکترومغناطیسـی از قبیـل ضـریب گذردهی الکتریکـی، نفوذپـذیری مغناطیسـی، امپـدانس و ضریب شکست بازیابی می شود. خواهیم دیـد کـه ضـرایب عبوردهی الکتریکـی و نفوذپـذیری مغناطیسـی در بعضـی محدوده های فرکانسی تراهرتز منفی مـی شـوند، بنـابراین فرامواد طراحی شده، در صورت اسـتفاده در انـواع مختلـف آنتن ها در بازه فرکانسی تراهرتز می توانند جهـت کنتـرل فاز، دامنه و قطبش موج فرودی کاربرد داشته باشند.

۲- طراحی ساختار

یک سلول واحـد، متشـکل از دو حلقـه شـکافدار بسـیار نزدیک به هم هستند که در جهـت هـای مخـالف یکـدیگر قرار گرفتـه انـد، حلقـه هـا از مـواد فلـزی غیرمغناطیسـی ساخته می شوند، حلقه ها معمولا به صـورت دایـره ای یـا مربعی بوده و هم مرکز می باشند.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]



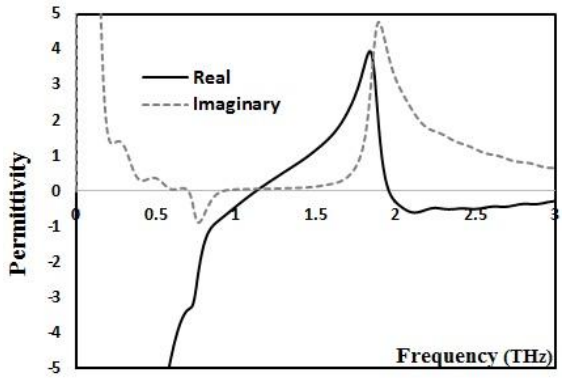
الف) نمای کلی ب) نمای جلو ج) نمای پشت

شکل ۱- سلول واحد متشکل از حلقه های دایره ای شکافدار و سیم نازک
الف) نمای کلی سلول ب) تصویر از جلو ج) تصویر از پشت

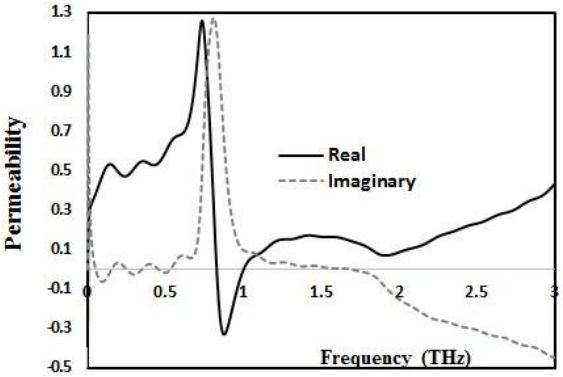
در شکل ۱ تصویر سلول واحد فرامواد طراحی شده، نشان داده شده است. سلول واحد طراحی شده به صورت مکعبی می باشد، اندازه سلول ۲۰ میکرومتر است. زیرلایه از جنس ماده نیمه رسانای گالیم آرسنایدست. در یک طرف زیرلایه، یک تشدیدگر که از دو حلقه شکافدار هم مرکز از جنس مس می باشند، تعبیه شده است. در طرف دیگر زیرلایه، یک میله از جنس همان حلقه ها با فاصله یکسان از شکاف حلقه ها و دقیقا در وسط زیرلایه گالیم آرسنایدقرار می‌گیرد. ضخامت میله و هر کدام از حلقه ها برابر با ۰/۱ میکرومتر، پهنای هر دو دایره کوچک و بزرگ برابر با ۲ میکرومتر در نظر گرفته شده است. شعاع داخلی دایره کوچکتر ۳/۵ میکرومتر و شعاع داخلی دایره بزرگتر ۷/۵ میکرومتر و گپ حلقه کوچک و بزرگ به صورت یکسان برابر با ۲/۴ میکرومتر طراحی شده است. پارامترهای بسیاری از جمله ضخامت حلقه ها و میله، گپ حلقه ها، شعاع حلقه ها می توانند در نتایج خروجی تاثیرگذار باشند، برای دستیابی به بهینه ترین خروجی ممکن، ضخامت حلقه ها از ۰/۰۲ میکرومتر تا ۰/۵ میکرومتر، گپ حلقه ها از ۱/۲ میکرومتر تا ۳/۶ میکرومتر و شعاع حلقه ها از ۱/۵ میکرومتر تا ۱۲/۵ میکرومتر شبیه سازی و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه گردید.

۳- نتایج شبیه سازی

در این بخش، سلول واحد فرامواد طراحی شده، مورد تحلیل و شبیه سازی قرار می‌گیرد. شبیه سازیها با استفاده از نرم افزار CST Microwave Studio در حوزه زمان انجام شده است. برای تمامی پارامترهای الکترومغناطیسی، نمودار حقیقی (خط ثابت) و موهومی (نقطه‌چین) آورده شده است. شکل۲ نمودار حقیقی و موهومی گذردهی الکتریکی را نشان می دهد، در نمودار حقیقی، در بازه فرکانسی زیر ۱ تراهرتز و در بازه فرکانسی ۲ تا ۳ تراهرتز، ضریب گذردهی الکتریکی مقدار منفی را نشان می‌دهد. در نمودار موهومی نیز در بازه بین ۰/۷ تا ۰/۹ تراهرتز، مقدار گذردهی الکتریکی منفی می باشد. در نزدیکی فرکانس ۰/۷ تراهرتز نیز یک حالت تشدید بین نمودار حقیقی و نمودار موهومی بوجود آمده است. شکل۳ نمودار نفوذپذیری مغناطیسی در حالت موهومی و حقیقی را نشان می دهد، نفوذپذیری مغناطیسی در نمودار حقیقی در بازه فرکانسی بین ۰/۷ تا ۱ تراهرتز منفی است و در نمودار موهومی، زیر فرکانس ۰/۵ تراهرتز و بین ۲ تا ۳ تراهرتز نیز نفوذپذیری مغناطیسی منفی شده است. همانند نمودار گذردهی الکتریکی، در فرکانس ۰/۷ تراهرتز تشدید وجود دارد.



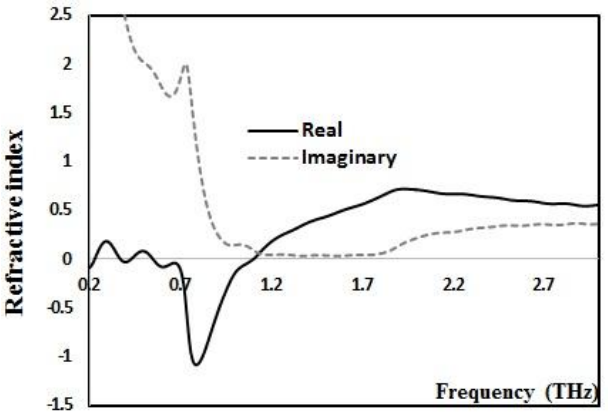
شکل۲- نمودار حقیقی و موهومی گذردهی الکتریکی



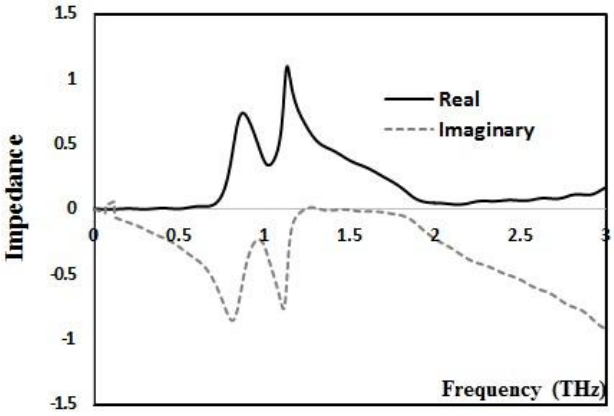
شکل۳- نمودار حقیقی و موهومی نفوذپذیری

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]



شکل۴- نمودار حقیقی و موهومی ضریب شکست



شکل۵- نمودار حقیقی و موهومی امپدانس

شکل۴ نمودار ضریب شکست را نشان می دهد. قسمت حقیقی نمودار در بازه فرکانسی ۰/۷ تا ۱/۲ تراهرتز، ضریب شکست منفی شده است، که نشان می دهد سلول واحد فرامادی طراحی شده، خاصیت چپگردی داشته و می تواند روی فاز، دامنه و قطبش موج فرودی به سلول واحد فرامادی تاثیر گذاشته و منجر به تغییر در برهمنکش بین موج و ماده شود. از آنجا هیچ ماده ای به طور طبیعی دارای ضریب شکست منفی نمی باشد، استفاده از سلول واحد فرامادی طراحی شده می‌تواند در بسیاری از کاربردهای اپتیکی ناحیه تراهرتز، در تغییر ضریب شکست ماده مورد استفاده، تاثیرگذار باشد. شکل۵ نمودار حقیقی و موهومی امپدانس را نشان می دهد. در نمودار حقیقی امپدانس، در بازه فرکانسی زیر ۰/۷ تراهرتز و بین ۱/۹ تراهرتز تا ۳ تراهرتز مقدار امپدانس سلول واحد فرامادی در پایین ترین مقدار خود قرار دارد. ارتباط بین امپدانس و ضریب شکست سلول واحد فرامادی، نشان می دهد تطبیق مناسبی بین ساختار طراحی شده وجود دارد و بیانگر این موضوع است که قرار گیری سلول واحد فرامادی طراحی شده در کنار مواد دیگر، خصوصا بر روی زیرلایه آنتن ها، با تغییر در مقدار امپدانس آنتن، قابلیت تنظیم‌پذیری فرکانسی را برای آنتن مهیا می کند.

۴- جمع بندی

در سال های اخیر استفاده از فرامواد به دلیل ویژگی های منحصر بفردی که دارند مانند ایجاد ضریب شکست منفی، تنظیم پذیری فرکانسی و ... بسیار مورد توجه و توسعه قرار گرفته است. در این مقاله، یک سلول واحد فرامادی در ناحیه فرکانسی تراهرتز، طراحی و شبیه سازی شد و پارامترهای الکترومغناطیسی آن از جنبه میکروسکوپیک استخراج شد. همانطور که انتظار داشتیم، پارامترهای الکترومغناطیسی سلول واحد فرامادی شامل عبوردهی الکتریکی، نفوذپذیری مغناطیسی و ضریب شکست در بعضی از بازه های فرکانسی باند تراهرتز، مقادیر منفی از خود نشان می دهند، همین موضوع می-تواند گام مهمی در طراحی و پیاده سازی بسیاری از ساختارهای فرامادی در انواع مختلف فیلترها، سنسورها، آنتن ها و دیگر ادوات الکترواپتیکی و فوتونیکی در بازه فرکانسی تراهرتز باشد.

مرجع‌ها

[1] D. H. Auston, K. P. Chung, and P. R. Smith, "Picosecond photoconducting hertzian dipoles," Appl. phys. Lett. vol. 45, pp. 284, 1984.

[۲] امیر علیزاده، مجید ناظری و احمد ساجدی، *طراحی و شبیه سازی آنتن نوررسانشی تراهرتز بر پایه ساختار فرامواد*، کنفرانس اپتیک و لیزر، ۱۳۹۶.

[3] J. B. pendry, A. J. Holden, W. J. Stewart, D. J. Robbins, "magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena", Microw. Theory Tech. IEEE Trans. Vol. 47, no. 11, 1999.

[4] V. M. Shalaev, "Optical negative index metamaterial" Nat. Photonics, Vol. 1, no. 1, pp. 41-48, 2007.

[5] D. R. Smith, D. C. Vier, "Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterial", physics review, E. 71, 2005.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]