



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 فراموادى 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 فراموادى در باند فرکانسى تراهرتز طراحی و شبیه سازی شده است و پارامترهای الکترومغناطیسی آن از قبیل گذردهی الکتريکی، نفوذپذیری مغناطیسی، ضریب شکست و امپدانس به صورت همزمان بازیابی می شود. 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 فراموادى 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 its 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.

۱- مقدمه

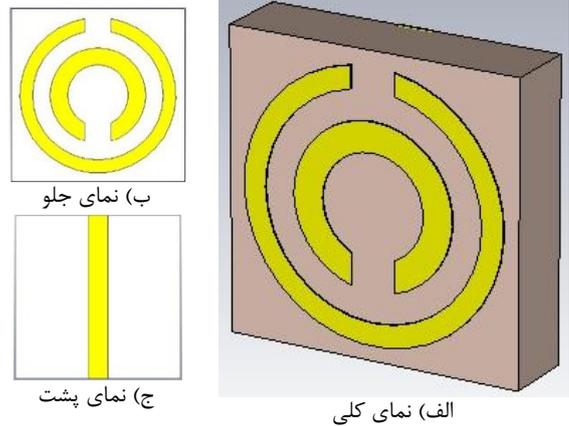
فرامواد به موادی گفته می‌شوند که در ماهیت ساختاری خود، دارای خواص الکترومغناطیسی نامتعارف هستند. از منظر الکترومغناطیسی مواد موجود در طبیعت به دو دسته طبیعی و فرامواد تقسیم بندی می‌شوند. فرامواد به طور مستقیم و عادی در طبیعت وجود نداشته و بایستی به صورت مصنوعی و مهندسی شده ساخته شوند. فرامواد برای اولین بار در سال ۱۹۶۸ با مطالعه روی ماده ای که به طور همزمان دارای $\epsilon, \mu < 0$ است، معرفی شد. ساختارهای فراموادی، به دلیل آنکه قادر به کنترل فاز، دامنه و قطبش امواج فرودی هستند، بسیار مورد توجه قرار گرفته اند [۱]. در سال‌های اخیر، استفاده و کاربرد فرامواد در انواع مختلف آنتن‌ها، سنسورها و فیلترها بسیار گسترش یافته و مورد توجه قرار گرفته است، که در همین راستا طرح استفاده از فرامواد در زیرلایه آنتن‌های نوررسانشی تراهرتز را برای افزایش توان خروجی و بهبود جهت‌مندی آنتن پیشنهاد دادیم [۲]. فرامواد متشکل از سلول‌های واحد در ابعاد کوچکتر از طول موج نور فرودی هستند، از آنجا که ضرب خارجی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در این مواد از قانون دست چپ پیروی می‌کند، این مواد را اصطلاحاً "مواد چپگرد" نیز می‌نامند. در سال ۱۹۹۹ با استفاده از میله‌های فلزی، توانستند ماده ای با ضریب عبوردهی الکتریکی منفی را بسازند. علاوه بر عبوردهی الکتریکی ساخت موادی با نفوذپذیری مغناطیسی منفی نیز ضروری بود. این مهم، با استفاده از آرایه‌هایی از تشدیدگرهای حلقه ای شکافدار، در محدوده فرکانسی مایکروویو و تراهرتز بدست آمد [۳]. خصوصیات الکترومغناطیسی ساختارهای همگن با استفاده از حل معادلات ماکسول و مشخص شدن ارتباط بین میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی محلی، با جریان و چگالی بار تعیین می‌گردد. گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی، نشان دهنده پاسخ ماکروسکوپی محیط همگن به میدان‌های محلی اعمال شده است. مطابق قانون فارادی، اعمال میدان مغناطیسی به حلقه فلزی، سبب القای جریان

الکتریکی در آن می‌شود، حلقه فلزی معادل یک سلف است، بر اساس قانون لنز، حلقه با میدان مغناطیسی اعمالی، مخالفت می‌کند، در نتیجه خاصیت دیامغناطیس که همان کاهش نفوذپذیری است، از خود نشان می‌دهد. در حالت عادی این کاهش نفوذپذیری بسیار ناچیز است، اما در تشدیدگر حلقه ای شکافدار، به دلیل وجود خاصیت خازنی بین دو حلقه، این کاهش نفوذپذیری به صورت تشدید (حاصل از تشدید سلف و خازن) می‌تواند رخ دهد و مقدار نفوذپذیری مغناطیسی را منفی کند [۴]. فرامواد را می‌توان از دو جنبه میکروسکوپی و ماکروسکوپی مورد بررسی قرار داد، در بررسی میکروسکوپی، سلول واحد سازنده فرامواد که از میله و حلقه تشکیل شده است تحلیل می‌شود و در بررسی ماکروسکوپی اثر نهایی سلول‌ها در کنار یکدیگر، از نظر گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در سال ۲۰۰۵ سلول‌های واحد فراموادی در ابعاد میلیمتر و در سه حالت مختلف در محدوده فرکانسی گیگاهرتز، مورد تحلیل و شبیه‌سازی قرار گرفتند [۵]. در این مقاله، در ادامه کار فوق، یک سلول واحد فراموادی در ابعاد میکرومتر و در بازه فرکانسی تراهرتز طراحی و شبیه‌سازی شده و پارامترهای الکترومغناطیسی از قبیل ضریب گذردهی الکتریکی، نفوذپذیری مغناطیسی، امپدانس و ضریب شکست بازیابی می‌شود. خواهیم دید که ضرایب عبوردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی در بعضی محدوده‌های فرکانسی تراهرتز منفی می‌شوند، بنابراین فرامواد طراحی شده، در صورت استفاده در انواع مختلف آنتن‌ها در بازه فرکانسی تراهرتز می‌توانند جهت کنترل فاز، دامنه و قطبش موج فرودی کاربرد داشته باشند.

۲- طراحی ساختار

یک سلول واحد، متشکل از دو حلقه شکافدار بسیار نزدیک به هم هستند که در جهت‌های مخالف یکدیگر قرار گرفته‌اند، حلقه‌ها از مواد فلزی غیرمغناطیسی ساخته می‌شوند، حلقه‌ها معمولاً به صورت دایره ای یا مربعی بوده و هم مرکز می‌باشند.

از نرم افزار CST Microwave Studio در حوزه زمان انجام شده است. برای تمامی پارامترهای الکترومغناطیسی، نمودار حقیقی (خط ثابت) و موهومی (نقطه چین) آورده شده است. شکل ۲ 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 می دهد. 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. شکل ۳ 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.

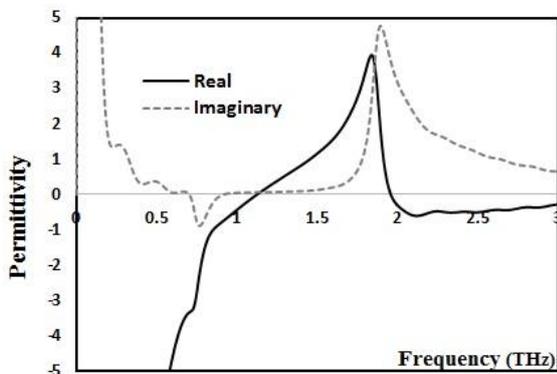


شکل ۱- سلول واحد متشکل از حلقه های دایره ای شکافدار و سیم نازک
 (الف) نمای کلی سلول (ب) تصویر از جلو (ج) تصویر از پشت

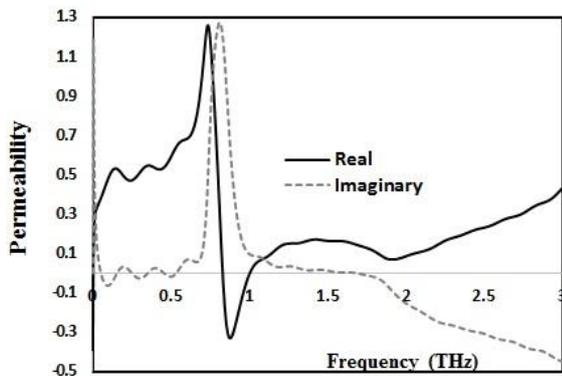
در شکل ۱ تصویر سلول واحد فرامواد طراحی شده، نشان داده شده است. سلول واحد طراحی شده به صورت مکعبی می باشد، اندازه سلول ۲۰ میکرومتر است. زیرلایه از جنس ماده نیمه رسانای گالیم آرسناید است. در یک طرف زیرلایه، یک تشدیدگر که از دو حلقه شکافدار هم مرکز از جنس مس می باشند، تعبیه شده است. در طرف دیگر زیرلایه، یک میله از جنس همان حلقه ها با فاصله یکسان از شکاف حلقه ها و دقیقاً در وسط زیرلایه گالیم آرسناید قرار می گیرد. 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 می گیرد. شبیه سازیها با استفاده



شکل ۲- نمودار حقیقی و موهومی گذردهی الکتریکی



شکل ۳- نمودار حقیقی و موهومی نفوذپذیری

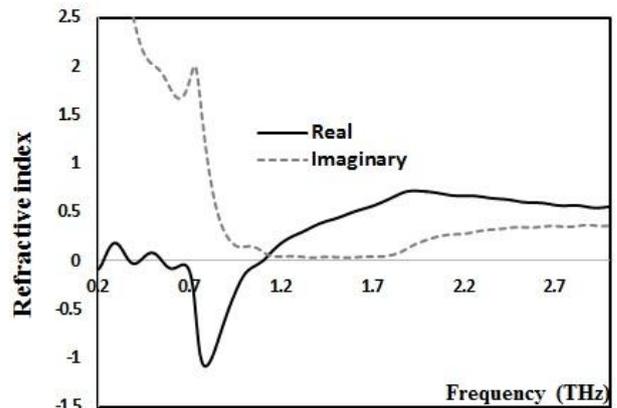
تطبیق مناسبی بین ساختار طراحی شده وجود دارد و بیانگر این موضوع است که قرار گیری سلول واحد فراموادی طراحی شده در کنار مواد دیگر، خصوصا بر روی زیرلایه آنتن ها، با تغییر در مقدار امپدانس آنتن، قابلیت تنظیم پذیری فرکانسی را برای آنتن مهیا می کند.

۴- جمع بندی

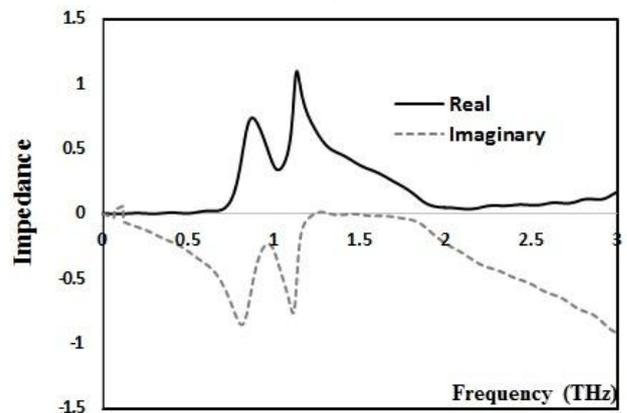
در سال های اخیر استفاده از فرامواد به دلیل ویژگی های منحصر بفردی که دارند مانند ایجاد ضریب شکست منفی، تنظیم پذیری فرکانسی و ... بسیار مورد توجه و توسعه قرار گرفته است. در این مقاله، یک سلول واحد فراموادی در ناحیه فرکانسی تراهرتز، طراحی و شبیه سازی شد و پارامترهای الکترومغناطیسی آن از جنبه میکروسکوپی استخراج شد. همانطور که انتظار داشتیم، پارامترهای الکترومغناطیسی سلول واحد فراموادی 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 فراموادی در انواع مختلف فیلترها، سنسورها، آنتن ها و دیگر ادوات الکترواپتیکی و فوتونیک در بازه فرکانسی تراهرتز باشد.

مرجع ها

- [1] D. H. Auston, K. P. Chung, and P. R. Smith, "Picosecond photoconducting hertzian dipoles," Appl. phys. Lett. vol. 45, pp. 284, 1984.
- [2] 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.



شکل ۴- نمودار حقیقی و موهومی ضریب شکست



شکل ۵- نمودار حقیقی و موهومی امپدانس

شکل ۴ 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 فراموادی طراحی شده، خاصیت چپگردی داشته و می تواند روی فاز، دامنه و قطبش موج فرودی به سلول واحد فراموادی تاثیر گذاشته و منجر به تغییر در برهنمکش بین موج و ماده شود. از آنجا هیچ ماده ای به طور طبیعی دارای ضریب شکست منفی نمی باشد، استفاده از سلول واحد فراموادی طراحی شده می تواند در بسیاری از کاربردهای اپتیکی ناحیه تراهرتز، در تغییر ضریب شکست ماده مورد استفاده، تاثیرگذار باشد. شکل ۵ 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 فراموادی در پایین ترین مقدار خود قرار دارد. ارتباط بین امپدانس و ضریب شکست سلول واحد فراموادی، نشان می دهد