بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

طراحی و شبیه‌سازی جاذب امواج الکترومغناطیسی مبتنی بر فراماده تقریبا مستقل از زاویه و قطبش موج فرودی

محمد خیرخواه، مجید قناعت‌شعار

آزمایشگاه نانومغناطیس و نیمرساناهای مغناطیسی، پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، اوین، تهران

چکیده - این مقاله به مطالعه جذب‌کننده‌های میکروموج بر پایه ساختارهای فراماده می‌پردازد. جذب کننده از آرایه‌ای دوره‌ای از یک مشدد به ضخامتی در حدود یک صدم طول موج فرودی ساخته شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این جذب کننده در فرود عمود می‌تواند به بیشینه مقدار ۹۹/۷ درصد در فرکانس ۱۳/۲ گیگا هرتز برسد. این جذب کننده تقریبا مستقل از زاویه قطبی و سمتی موج فرودی برای امواج *TE* و *TM* کار می‌کند.

کلید واژه- فراماده، جذب کننده موج الکترومغناطیسی.

Design and simulation of almost polarization/angle insensitive electromagnetic wave absorber based on meta-material structures

Mohammad Kheirkhah, Majid Ghanaatshoar

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, G.C., Evin, 1983969411, Tehran, Iran

Abstract- this article presents a study on a microwave absorber based on meta-material structures. The absorber is constructed of a periodic array of a new resonant structure with the thickness of about 1/100 of the incidence wavelength. Simulation results show that the absorber can operate with an absorption peak of 99.7% at frequency of 13.2 GHz given a normally incident electromagnetic wave. This absorber is almost incident polar and azimuth angle independent for both transverse magnetic and transverse electric polarizations.

Keywords: meta-material, electromagnetic wave absorber.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

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

۱- مقدمه

فراموادساختارهایی هستند که خواص الکترومغناطیسی آنها در مواد موجود در طبیعت یافت نمی‌شود [۱]. مواد دوگانه منفی[1]، ساختارهای گاف نواری الکترومغناطیسی و سطوح انتخاب فرکانسی[2]، مثال‌هایی از فراموادهستند. این مواد به طور گسترده برای افزایش کارایی وسیله‌های میکروموجی مثل آنتن‌ها [۲] و فیلترها [۳] مورد استفاده قرار می‌گیرند. تراوایی مغناطیسی و گذردهی دی‌الکتریکی فراموادرا می‌توان کنترل نمود. ε و μ این ساختارها دارای بخش‌های حقیقی و موهومی‌اند. پژوهش‌های زیادی برای کنترل قسمت حقیقی ε و μ به منظور کمینه کردن اتلاف این ساختارها انجام شده است. این کار کمک شایانی به ساختارهای مجتمع[3]، مثل ترکیب آنتن و فراموادمی‌کند. فراموادبرای افزایش بهره[4] آنتن‌ها نیز بکارگرفته شده‌اند [۲]. در سال‌های اخیر محققان به کنترل قسمت موهومی پارامترهای سازنده فراموادبرای طراحی مواد با اتلاف بالا به منظور استفاده در جذب کننده‌های الکترومغناطیسی روی آورده‌اند. ساختاری که بتواند از بازتاب و عبور امواج الکترومغناطیسی جلوگیری کند یک جذب کننده الکترومغناطیسی است. اگر امپدانس ساختار با امپدانس خلا یکی باشد، جذب در این ساختارها بیشینه است [۴].

جذب هر فراماده را می‌توان از رابطه $A(\omega)=1-T(\omega)-R(\omega)$ محاسبه کرد. پارامترهای جذب (A)، عبور (T) و بازتاب (R) همگی به فرکانس وابسته‌اند. برای بدست آوردن یک ساختار جذب کننده کامل باید $A=1$ و بازتاب و عبور صفر باشند. در عمل صفر کردن این پارامترها مشکل است. برای ساده‌سازی، محققان از یک صفحه پس‌زمینه به جنس مس استفاده می‌کنند تا عبور را به طور کامل صفر کنند. بنابراین تمرکز اصلی روی کمینه کردن مقدار بازتاب است. با طراحی مناسب ساختار جذب کننده‌ها می‌توان امپدانس ساختار مورد نظر را با امپدانس خلا یکی کرد. در نتیجه بازتاب از ساختار نیز صفر می‌شود.

۲- مکانسیم جذب

جذب کننده‌های امواج الکترومغناطیسی بر پایه فراموادساسا از سطوح انتخاب فرکانسی الهام گرفته شده‌اند. اولین سطح انتخاب فرکانسی توسط مهندس آمریکایی سالیسبری[5] در سال ۱۹۵۲ ساخته شد و آن را صفحه سالیسبری نامیدند [۵]. یک صفحه سالیسبری از سه لایه تشکیل شده بود: ۱) یک صفحه نازک براق ۲) زیر لایه دی‌الکتریک کم اتلاف با ضخامت دقیقی متناسب با یک چهارم طول موج فرودی و ۳) یک سطح فلزی به عنوان پس‌زمینه از جنس مس. ضخامت یک چهارم طول موجی زیرلایه اختلاف فاز ۱۸۰ درجه‌ای بین امواج فرودی از صفحه براق نازک و بازتابی از صفحه فلزی پس‌زمینه ایجاد می‌کند که باعث ایجاد تداخل مخرب می‌شود. اما دو نقیصه مهم این صفحات، ضخامت بالای زیرلایه و پهنای جذب پایین بودند. برای ارضای شرط تداخل ویرانگر لایه دی‌الکتریک باید ضخامتی به اندازه یک چهارم طول موج بخش بر ضریب شکست داشته باشد. اگر طول موج فرودی بالا باشد ضخامت دی‌الکتریک نیز زیاد می‌شود. همچنین برای صفحات سالیسبری جذب فقط در طول موج مشخصی اتفاق می‌افتد که شرط تداخل ویرانگر را ارضا می‌کند. بنابراین پهنای نوار جذب بسیار کوچک است.

بیشتر جذب کننده‌های الکترومغناطیسی بر پایه‌ی فراموادنیز از سه لایه تشکیل شده‌اند: ۱) لایه‌ای از الگوهای فلزی ۲) لایه دی‌الکتریک و ۳) یک لایه فلزی به عنوان پس-زمینه. اساس کار این جذب کننده‌ها تقریبا مشابه صفحات سالیسبری است، اما دو تفاوت اصلی وجود دارد:

۱) لایه اول صفحه براق با ساختارهای دوره‌ای از طرح‌های فلزی جایگزین شده است.
۲) ضخامت لایه دی‌الکتریک می‌تواند خیلی کوچکتر از طول موج فرودی باشد.

[1] Double negative material
[2] Frequency selective surface
[3] Integrated structure
[4] Gain
[5] Salisbury

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

نقش اساسی لایه دی‌الکتریک فراهم کردن فضایی برای امواج الکترومغناطیسی فرودی است که در آنجا جذب شوند. دی‌الکتریک در صفحات سالیسبری بدون اتلاف هستند تا تداخل ویرانگر را فراهم کنند اما در اینجا دی-الکتریک‌ها جاذب هستند تا خودشان نیز باعث جذب شوند. در جذب کننده‌های فرامواد، پاسخ الکتریکی ساختار از پاسخ درود[۶]- شکل پس‌زمینه و درود- لورنتزی[۷] الگوهای فلزی که نقش مشددهای الکتریکی را بازی می-کنند حاصل می‌شود و پاسخ مغناطیسی از جریان‌هایی بدست می‌آید که در الگوهای فلزی و همچنین پس‌زمینه بوجود می‌آیند. این جریان‌ها از نظر جهت متفاوت هستند و بنابراین میدان مغناطیسی با آنها جفت شده و پاسخ لورنتزی گونه‌ی تراوایی مغناطیسی را فراهم می‌کند. پاسخ الکتریکی با تنظیم هندسه مشددهای الکتریکی و پاسخ مغناطیسی با تنظیم فاصله بین این مشددها و صفحه پس‌زمینه تغییر می‌کند [۶].

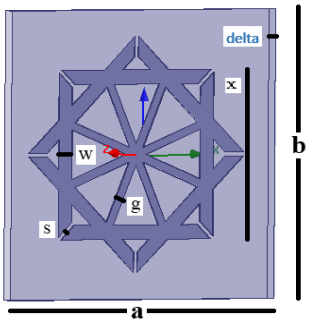
در این مقاله به طراحی یک جذب کننده امواج الکترومغناطیسی بر پایه فرامواد می‌پردازیم که علاوه بر مستقل بودن از قطبش موج فرودی به تقریب به زاویه قطبی موج فرودی نیز وابسته نباشد.

۳- طراحی ساختار

شکل ۱ ساختار انتخابی جذب کننده امواج الکترومغناطیسی بر پایه فرمواد را نشان می‌دهد. ساختار مورد نظر از دو ورقه فلزی به جنس مس تشکیل شده است که از دو طرف روی لایه‌ی دی‌الکتریک به جنس FR4-epoxy با ضریب دی‌الکتریک ۴/۳ و اتلاف ۰/۰۲۲ و ضخامت delta=۰/۳ mm قرارگرفته‌اند. ابعاد ساختار مورد نظر در جدول ۱ فهرست شده است. شبیه‌سازی‌ها توسط نرم افزار HFSS[۸] انجام شده است. ساختار مورد نظر را در یک موجبر قرار دادیم و شرایط مرزی مناسب (master/slave) بر دیواره‌های موجبر اعمال کردیم. شکل ۲ مقدار جذب در زوایای فرودی متفاوت به ترتیب برای قطبش TE و TM در این ساختار را نشان می‌دهد. همانطور که می‌بینیم در زوایای نزدیک به عمود ساختار جذب بالایی از خود نشان می‌دهد که به تقریب مستقل از قطبش و زاویه فرود است. برای مثال برای فرود عمود یک جذب ۹۹/۷ درصدی در فرکانس ۱۳/۲ گیگاهرتز دیده می‌شود.

جدول ۱: ابعاد ساختار جذب کننده (بر حسب میلی‌متر)

ابعاد صفحه پس‌زمینه	۷ × ۷ × ۰/۰۲
ابعاد لایه دی‌الکتریک	۷ × ۷ × ۰/۳
ضخامت مشددالکتریکی	۰/۰۱۸
x	۴/۱
g	۰/۲
W	۰/۳
s	۰/۱



شکل ۱: ساختار یک سلول جذب کننده امواج الکترومغناطیسی بر پایه فرامواد.

با توجه به حضور لایه مس در پشت ساختار چنین جذب بالایی را باید با تطابق امپدانسی بسیار خوب در ارتباط بدانیم. به عنوان مثال، با محاسبه امپدانس ساختار مورد نظر از روش بازگشتی اسمیت [۷] و رسم آن، همانطور که در شکل ۳ نشان داده‌ایم، مشاهده می‌کنیم که مقدار امپدانس در فرکانس جذب برای فرود با زاویه قطبی صفر درجه برابر است با Z=1.17+0.02i. این مقدار بسیار نزدیک به امپدانس خلا است.

[6] Drude
[7] Drude-lorentz
[8] High frequency structure simulator

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

۴- نتیجه‌گیری

به طور خلاصه ساختار جذب کننده الکترومغناطیسی فوق نازک جدیدی بر پایه فرامواد طراحی کردیم که در فرکانس ۱۳/۲ گیگاهرتز یک جذب ۹۹/۷ درصدی از خود نشان می‌دهد، که مقدار جذب آن تقریبا مستقل از قطبش موج فرودی و زاویه قطبی (θ) تابش است.

مراجع

[1] Veselago V. G., *The electrodynamics of substances with simultaneously negative electrical and magnetic permeabilities*. **Sov. Phys. Usp**. vol. 10, (1968) 509–517.

[2] Wu B.-I., Wang W., Pacheco J., Chen X., Grzegorczyk T. M., and Kong J. A., *A study of using metamaterials as antenna substrate to enhance gain*. **Progress In Electromagnetics Research PIER**. vol. 51, (2005) 295-328.

[3] Kong G. and Kahng S., *Design of a dual-band metamaterial band pass filter using zeroth order resonance*. **Progress In Electromagnetics Research C.** vol. 12, (2010) 149-162.

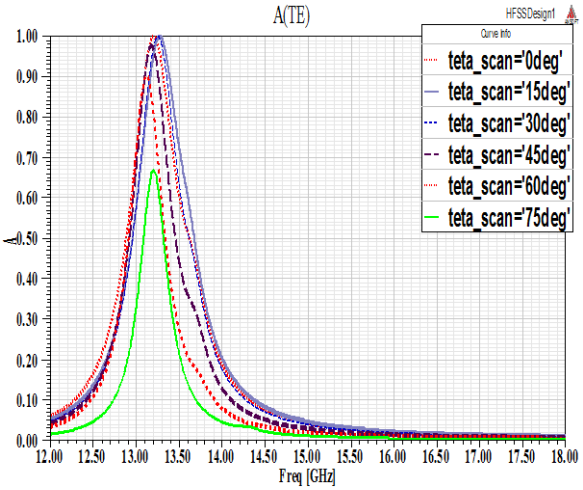
[4] Li M.-H., Liang H.-L., and Li X.-W., *Perfect metamaterial absorber with dual bands*. **Progress In Electromagnetics Research**. vol. 108, (2010) 37-49.

[5] ChengY,NieY, Gong R,Yang H., *Multi-band metamaterial absorber using cave-cross resonator*. **Eur. Phys. J. Appl. Phys.** 56 (2011) 31301.

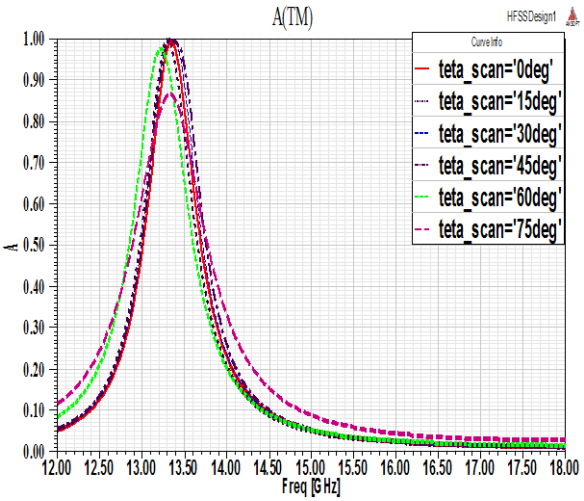
[6] Chen Q MaY, Grant J, Saha SC, Khalid A, *A terahertz polarization insensitive dual band metamaterial absorber*. **Opt. Lett**. 36 (2011) 945–947.

[7] Smith D.R., Schultz S., Markos P., and M.C. Soukoulis, *Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients*. **Phys Rev B** 65 (2002) 195104.

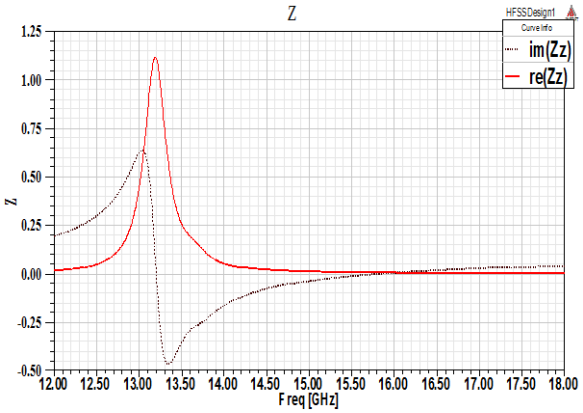
(a



(b



شکل ۲: مقدار جذب برای زوایای فرودی قطبی متفاوت به ترتیب برای a) قطبش TE و b) قطبش TM



شکل ۳: امپدانس نسبی ساختار موردنظر برای فرود عمود و زاویه قطبی صفر درجه. بخش موهومی با نقطه چین و بخش حقیقی با خط ممتد نشان داده شده است

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]