

بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران. ۱۳۹۸ بهمن ۱۳۹۸



طراحی و شبیهسازی موجبر دایروی تراهر تز با پوسته فرامواد

امیررضا روح بخش طیرانی، مهرداد شکوه صارمی

گروه مهندسی برق، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده– با استفاده از ترکیب فلز–دیالکتریک یا فرامواد در موجبرهای تراهرتز میتوان عملکرد این موجبرها را بهبود بخشید. نوع خاصی از فرامواد به نام فرامواد هذلولی هستند که خاصیت ناهمسانگردی دارند. با استفاده از فرامواد هذلولی در موجبرهای هسته توخالی تراهرتز، میتوان انتشار مدهای مرتبه بالاتر را حذف کرد. در این مقاله ابتدا موجبری هسته توخالی با پوشش فرامواد طراحی میشود که نسبت به کارهای پیشین و در همان عرض باند، تلفات انتشاری کمتری دارد. سپس با استفاده از همگن سازی، موجبر طراحی شده که ساختاری ناهمگن دارد را به موجبری همگن تبدیل میکنیم که از نظر مشخصات الکترومغناطیسی تقریبی از موجبر ناهمگن است و این ساختار همگن با توجه به پیچیدگی کمتر به منظور تحلیل و شبیه سازی نسبت به ساختار ناهمگن راحت تر است.

كليد واژه- تراهرتز، موجبر دايروى، فرامواد، همگن سازى.

Design and Simulation of Terahertz Circular Waveguide with Metamaterial Cladding

Amirreza Roohbakhsh Tayarani, Mehrdad Shokooh-Saremi

Department of Electrical Engineering, Ferdowsi University of Mashhhad

a.roohbakhshtayerani@um.ac.ir, m_saremi@um.ac.ir

Abstract-Functionality of terahretz waveguides can be improved by using metamaterials as their cladding. There is a type of metamaterials, so-called hyperbolic metamaterial (HMM), which is anisotropic. By using (HMM) in cladding of THz waveguides, the transmission loss can be decreased. In this article, we design a THz circular waveguide with (HMM) cladding to achieve lower transmission loss in the same bandwidth as the previous research. Also by employing homogenization, the designed inhomogeneous waveguide is transformed to a homogeneous one with approximately similar electromagnetic characteristics also this homogeneous structure with lower complexity in cladding is more straightforward to analysis and simulation.

Keywords: Circular Waveguide, Homogenization, Metamaterial, Terahertz.

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

تک محوری است. در چنین محیطی روابط پاشندگی مدهای TE و TM به فرم زیر نوشته میشوند [3]:

$$\frac{k_t^2}{\varepsilon_t} + \frac{\beta^2}{\varepsilon_t} = k_0^2 \quad ; \quad TE \qquad (1)$$

$$\frac{k_t^2}{\varepsilon_z} + \frac{\beta^2}{\varepsilon_t} = k_0^2 \quad ; \quad TM \tag{(7)}$$

رابطه (۱) برای امواج TE بیان گر معادله دایره و رابطه (۲) برای امواج TM بیان گر معادله هذلولی است (به همین دلیل این محیطها، به محیط هذلولی شناخته می شوند)، k_0 عدد k_i موج فضای آزاد، $\beta = k_z$ بردار موج در طول موجبر و مولفه عرضی بردار موج است.

مدلسازی و طراحی

در مقاله [4] موجبری هسته هوایی با پوسته ترکیبی فلز-دیالکتریک (پوسته فرامواد) معرفی شده است. پوسته این موجبر متشکل از ۲۵ سیم فلزی (از جنس نقره) و هم جهت در طول موجبر درون مادهای دیالکتریک به نام COC قرار گرفته است. در این ساختار روابط پاشندگی (۱) و (۲) برقرار است.



شکل ۱: ساختار موجبر پیشنهادی با هسته هوایی و پوسته فرامواد. (شیارهای آبی رنگ از جنس نقره و شیارهای خاکستری رنگ از جنس COC هستند).

اما برای دستیابی به تلفات انتشاری مطلوب تر، تغییراتی مطابق شکل ۱ در ساختار موجبر [4]، ایجاد میکنیم. در این ساختار پیشنهادی، سیمهای فلزی از جنس نقره که هم

مقدمه

تراهر تز در محدوده فرکانسی THz (۱۰-۱۰) قرار می گیرد. امواج تراهرتز، امواج ريزموج با طول موج هايي كمتر از میلیمتر هستند که یونیزه کننده بافت نیستند. پرتوهای تراهر تز می توانند در طیف گسترده ای از مواد غیر هادی از جمله البسه، كاغذ، چوب، پلاستيك و سراميك نفوذ كنند اما بهشدت جذب مولکولهای قطبی مانند آب میشوند همچنین توسط فلزات نیز بازتاب میشوند. باند فرکانسی تراهرتز، بیشتر در سالهای اخیر مورد توجه قرار گرفته و تولید و انتقال این امواج چالشهای زیادی را به همراه داشته است. یکی از راههای انتقال این امواج استفاده از موجبرها است [1]. در این مقاله هدف آن است که ابتدا موجبری هسته توخالي طراحي كنيم كه پوسته آن تركيبي از فلز و دیالکتریک است و تلفات انتشاری آن نسبت به کارهای پیشین بهبود یافته است. سپس با استفاده از روابط همگن سازی ارائه شده در [2]، موجبر ناهمگن را به ساختاری همگن تبدیل میکنیم که از لحاظ مشخصههای الكترومغناطيسي، اين دو ساختار به صورت تقريبي معادل یکدیگر هستند.

موجبر با پوسته فرامواد

فرامواد هذلولی نوع خاصی از فرامواد هستند که خاصیت ناهمسانگردی دارند. در یک محیط ناهمسانگرد، مولفههای الکترومغناطیسی مانند ضریب گذردهی الکتریکی در هر جهت فضایی متفاوت هستند. . در یک ساختار ناهمسانگرد با فرض غیر مغناطیسی بودن (1 = 1) ، ثابت دیالکتریک به فرم $[\hat{z}\hat{z}, \hat{z}\hat{z} + \hat{y}\hat{y}) + \mathcal{E}_z$ تعریف میشود. t و zبه فرم $[\hat{z}\hat{z}, \hat{z}\hat{z} + \hat{y}\hat{z}]_0 = \overline{s}$ تعریف میشود. t و zانتشار مدها هستند. اگر z_{zz} $z \neq w_{yz}$ در نظر گرفته شود ساختار ناهمسانگرد دو محوری است و اگر شود ساختار ناهمسانگرد دو محوری است و اگر z_{zz}

۵۰۲

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

راستا با طول موجبر هستند به شیارهایی تبدیل می شوند که به صورت لایه لایه و یکی در میان فلز (نقره) و دی-الکتریک COC هستند. همچنین لایهای با ضخامت مشخص از جنس COC بین هسته هوایی و این شیارها قرار می گیرند. لازم به ذکر است در شبیه سازیهای پیش رو، شرایط مرزی پراکندگی درنظر گرفته شده است همچنین برای مشبندی از Physics-controlled mesh استفاده شده است.



شکل ۲: مقایسه تلفات انتشاری در [4] با ساختار پیشنهادی شکل ۱ (شبیه سازی با استفاده از نرم افزار کامسول صورت گرفته است).

همانطور که از شکل ۲ مشخص است انتشار تک مد مانند [4] در بازه فرکانسی ۲Hz ۰/۲۲ THz، تا ۳Hz ۲Hz، و در عرض باند ۲Hz ۲/۱۲ صورت گرفته است. در [4] کمترین تلفات برای مد اصلی TM₁ در بازه فرکانسی تک مد در ۲Hz برابر با ۸/۶۷ dB/m است. اما در ساختار پیشنهادی، کمترین تلفات انتشاری در بازه فرکانسی تک مد در فرکانس THz تلفات انتشاری در بازه فرکانسی تک مد در فرکانس THz کاهش یافتن تلفات جذبی یا به عبارت دیگر، ناشی از استفاده کمتر از ماده دی الکتریک (Zeonex) نسبت به ماده فلزی (نقره) در ساختار پیشنهادی است [4].

در [2] روابطی برای ساختارهای ترکیبی چند لایه و ساختارهایی که سیمهایی با ابعاد نانو درون محیط میزبان

واقع شدهاند ارائه شده است. با استفاده از این روابط میتوان ساختاری همگن را معادل ساختار ناهمگن بدست آورد.

$$\varepsilon_{\Box} = \varepsilon_h \left(1 - \frac{k_p^2}{k^2 + ikk_D} \right) \tag{(7)}$$

$$\varepsilon_{\perp} = \varepsilon_h \left[1 + p \, \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_h}{\varepsilon_h + (1 - p)(\varepsilon_s - \varepsilon_h) \, \mathrm{N}} \right] \tag{(f)}$$

روابط بالا برای ساختاری که سیمهایی فلزی درون ماده ميزبان (دىالكتريك) واقع شدهاند، تعريف شده است. رابطه (۳) بیانگر مولفه طولی ثابت دی الکتریک در جهت طول موجبر است (یک مولفه) و رابطه (۴) بیانگر مولفههای عرضی (دو مولفه) ثابت دی الکتریک نسبت به جهت طول موجبر است و $N = \frac{1}{2} - \frac{(\mathrm{kr})^2}{3} - j \frac{(\mathrm{kr})^3}{9}$ است. در این روابط k و $_{p}$ و $_{D}$ و $_{D}$ به ترتيب عدد موج محيط ميزبان و \mathcal{E}_h عدد موج فرکانس پلاسما و عدد موج برخورد هستند. و \mathcal{E}_s نیز به ترتیب برابر با ثابت دیالکتریک محیط میزبان \mathcal{E}_s و شیارهای دیالکتریک، ثابت دیالکتریک شیارهای فلزی واقع شده درون ماده میزبان هستند. همچنین hoنسبت سطح یا حجم ماده فلزی به ماده دیالکتریک در ساختار موجبر است. با اعمال روابط (۳) و (۴) در رابطه مىتوان ساختار موجبر $\stackrel{=}{\varepsilon} = \varepsilon_0[\varepsilon_t(\hat{x}\hat{x}+\hat{y}\hat{y})+\varepsilon_z\hat{z}\hat{z}\hat{z}]$ شکل ۳ (الف) را مطابق شکل ۳ (ب) در نظر گرفت و معادل سازی کرد.



س ۲۰ بباین تو ببر نست موایی با پوسته ای همگن. هوایی با پوسته ای همگن.

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

با توجه به روابط ذکر شده، ضریب شکست موثر و تلفات انتشاری حاصل شده در ساختار همگن شکل ۳ (ب) با ساختار غیر همگن شکل ۳ (الف) مقایسه و بررسی خواهند شد.

با توجه به شکلهای ۴ و ۵ ضریب شکست موثر و همچنین تلفات انتشاری ساختار همگن در مدهای TM₁ و TM₂ نسبت به ساختار غیر همگن دقیقا یکسان نیستند اما با این حال روند کلی تغییرات یکسان و مشابه است و می-با این حال روند کلی تغییرات یکسان و مشابه است و می-نوان مشخصههای الکترومغناطیسی، مانند ضریب شکست موثر و تلفات انتشاری در ساختار همگن را تقریبی از ساختار غیر همگن در نظر گرفت.



شکل۴: تغییرات ضریب شکست موثر مدهای TM₁ و TM₂ برای ساختار همگن و ساختار غیر همگن بر حسب فرکانس.



شکل۵: تغییرات تلفات انتشاری مدهای TM₁ و TM₂ برای ساختار همگن و ساختار غیر همگن بر حسب فرکانس.

نتيجهگيرى

در [4] موجبری معرفی شد که در پوسته این موجبر ۲۵ سیم فلزی از جنس نقره به صورت هم راستا در طول موجبر و درون ماده میزبان که از جنس COC هستند، قرار گرفته-اند. این ساختار خاصیت هذلولی و ناهمسانگردی دارد. در ساختار پیشنهادی، ۲۵ سیم فلزی به شیارهای لایه لایه که یکی در میان فلز و دیالکتریک است تبدیل میشوند، در این موجبر، تلفات انتشاری نسبت به [4] در عرض باند انتشار تک مد کاهش یافته است. همچنین با استفاده از روابط همگنسازی در [2] میتوان موجبر با ساختار ناهمسانگرد و ناهمگن را به ساختاری ناهمسانگرد و همگن تبدیل کرد. در این ساختار همگن برخی از مشخصههای الکترومغناطیسی مانند تلفات انتشاری و ضریب شکست موثر، تقریبی از ساختار ناهمگن است و به کارگیری ساختار همگن به جهت تحلیل و شبیه سازی نسبت به ساختار غیر همگن راحتتر است.

مرجعها

- S. Atakaramians, S. Afshar V, T. M. Monro, and D. Abbott, "Terahertz dielectric waveguides," *Advances in Optics and Photonics*, vol. 5, pp. 169-215, 2013.
- [2] C. R. Simovski, P. A. Belov, A. V. Atrashchenko, and Y. S. Kivshar, "Wire Metamaterials: Physics and Applications," *Advanced Materials*, vol. 24, pp. 4229-4248, 2012.
- [3] L. Ferrari, C. Wu, D. Lepage, X. Zhang, and Z. Liu, "Hyperbolic metamaterials and their applications," *Progress in Quantum Electronics*, vol. 40, pp. 1-40, 2015.
- [4] H. Li, S. Atakaramians, and B. T. Kuhlmey, "Low loss and single mode metal dielectric hybrid-clad waveguides for Terahertz radiation," in SPIE Micro+Nano Materials, Devices, and Applications, p. 8, 2015.