



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

۱۶-۱۵ بهمن ۱۳۹۸



طراحی و شبیه‌سازی موجبر دایروی تراهرتز 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 همگن‌سازی، 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 شبیه‌سازی نسبت به ساختار ناهمگن راحت‌تر است. کلید واژه- تراهرتز، موجبر دایروی، فرامواد، همگن‌سازی.

Design and Simulation of Terahertz Circular Waveguide with Metamaterial Cladding

Amirreza Roohbakhsh Tayarani, Mehrdad Shokooh-Saremi

Department of Electrical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

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

Abstract- Functionality of terahertz 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.

مقدمه

تراهرتز در محدوده فرکانسی (۰/۱-۱۰) THz قرار می‌گیرد. امواج تراهرتز، امواج ریزموج با طول موج‌هایی کمتر از میلیمتر هستند که یونیزه کننده بافت نیستند. پرتوهای تراهرتز می‌توانند در طیف گسترده‌ای از مواد غیر هادی از جمله البسه، کاغذ، چوب، پلاستیک و سرامیک نفوذ کنند اما به شدت 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 توخالی طراحی کنیم که پوسته آن ترکیبی 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 الکترومغناطیسی، این دو ساختار به صورت تقریبی 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 ($\mu = 1$)، ثابت دی‌الکتریک به فرم $\vec{\epsilon} = \epsilon_0[\epsilon_t(\hat{x}\hat{x} + \hat{y}\hat{y}) + \epsilon_z\hat{z}\hat{z}]$ تعریف می‌شود. t و z به ترتیب معادل مولفه‌های عمودی و موازی نسبت به جهت انتشار مدها هستند. اگر $\epsilon_{xx} \neq \epsilon_{yy} \neq \epsilon_{zz}$ در نظر گرفته شود ساختار ناهمسانگرد دو محوری است و اگر $\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} \neq \epsilon_{zz}$ در نظر گرفته شود، ساختار ناهمسانگرد

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

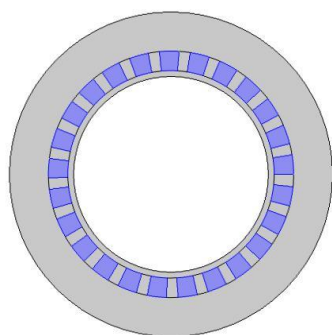
$$\frac{k_t^2}{\epsilon_t} + \frac{\beta^2}{\epsilon_t} = k_0^2 \quad ; \quad TE \quad (1)$$

$$\frac{k_t^2}{\epsilon_z} + \frac{\beta^2}{\epsilon_t} = k_0^2 \quad ; \quad TM \quad (2)$$

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

مدل سازی 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. (شماره‌های آبی رنگ از جنس نقره و شماره‌های خاکستری رنگ از جنس COC هستند).

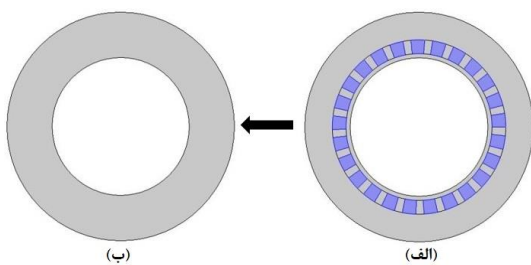
اما برای دستیابی به تلفات انتشاری مطلوب‌تر، تغییراتی مطابق شکل ۱ در ساختار موجبر [4]، ایجاد می‌کنیم. در این ساختار پیشنهادی، سیم‌های فلزی از جنس نقره که هم

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

$$\varepsilon_{\square} = \varepsilon_h \left(1 - \frac{k_p^2}{k^2 + i k k_D} \right) \quad (3)$$

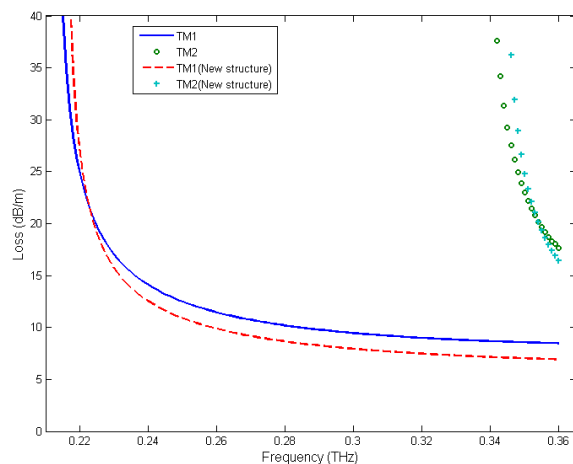
$$\varepsilon_{\perp} = \varepsilon_h \left[1 + p \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_h}{\varepsilon_h + (1-p)(\varepsilon_s - \varepsilon_h)N} \right] \quad (4)$$

روابط بالا برای ساختاری که سیم‌هایی فلزی درون ماده میزبان (دی‌الکتریک) واقع شده‌اند، تعریف شده است. رابطه (۳) بیانگر مولفه طولی ثابت دی‌الکتریک در جهت طول موجبر است (یک مولفه) و رابطه (۴) بیانگر مولفه‌های عرضی (دو مولفه) ثابت دی‌الکتریک نسبت به جهت طول موجبر است و $N = \frac{1}{2} - \frac{(kr)^2}{3} - j \frac{(kr)^3}{9}$ است. در این روابط k و k_p و k_D به ترتیب عدد موج محیط میزبان و عدد موج فرکانس پلاسما و عدد موج برخورد هستند. ε_h و ε_s نیز به ترتیب برابر با ثابت دی‌الکتریک محیط میزبان و شیارهای دی‌الکتریک، ثابت دی‌الکتریک شیارهای فلزی واقع شده درون ماده میزبان هستند. همچنین p نسبت سطح یا حجم ماده فلزی به ماده دی‌الکتریک در ساختار موجبر است. با اعمال روابط (۳) و (۴) در رابطه $\varepsilon = \varepsilon_0 [\varepsilon_x (\hat{x}\hat{x} + \hat{y}\hat{y}) + \varepsilon_z \hat{z}\hat{z}]$ می‌توان ساختار موجبر شکل ۳ (الف) را مطابق شکل ۳ (ب) در نظر گرفت و معادل سازی کرد.



شکل ۳: تبدیل موجبر هسته‌های با پوسته‌ای غیر همگن به موجبر هسته‌های با پوسته‌ای همگن.

راستا با طول موجبر هستند به شیارهایی تبدیل می‌شوند که به صورت لایه لایه و یکی در میان فلز (نقره) و دی‌الکتریک COC هستند. همچنین لایه‌ای با ضخامت مشخص از جنس COC بین هسته‌های هوا و این شیارها قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است در شبیه‌سازی‌های پیش رو، شرایط مرزی پراکندگی در نظر 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 (شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار کامسول صورت گرفته است).

همانطور که از شکل ۲ مشخص است انتشار تک مد مانند [4] در بازه فرکانسی ۰/۲۲ THz تا ۰/۳۴ THz و در عرض باند ۰/۱۲ THz صورت گرفته است. در [4] کمترین تلفات برای مد اصلی TM_1 در بازه فرکانسی تک مد در ۰/۳۴ THz برابر با ۸/۶۷ dB/m است. اما در ساختار پیشنهادی، کمترین تلفات انتشاری در بازه فرکانسی تک مد در فرکانس ۰/۳۴ THz برابر با ۷/۱۴ dB/m است. بهبود یافتن تلفات به دلیل کاهش یافتن تلفات جذبی یا به عبارت دیگر، ناشی از استفاده کمتر از ماده دی‌الکتریک (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

شکل ۵: تغییرات تلفات انتشاری مدهای TM_1 و TM_2 برای ساختار همگن و ساختار غیر همگن بر حسب فرکانس.

نتیجه گیری

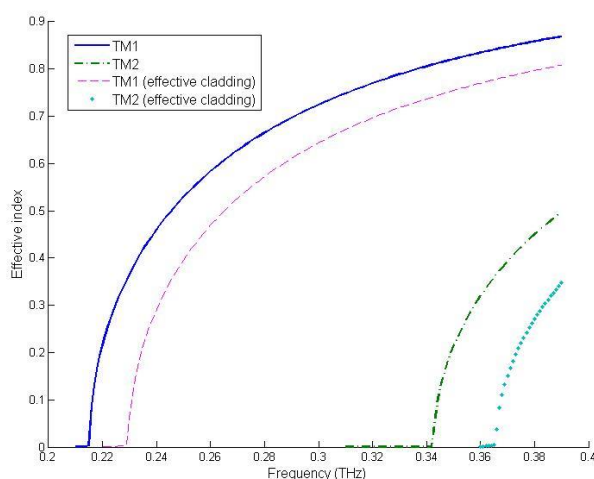
در [4] موجبری معرفی شد که در پوسته این موجبر ۲۵ سیم فلزی از جنس نقره به صورت هم راستا در طول موجبر و درون ماده میزبان که از جنس COC هستند، قرار گرفته- اند. این ساختار خاصیت هذلولی و ناهمسانگردی دارد. در ساختار پیشنهادی، ۲۵ سیم فلزی به شیارهای لایه لایه که یکی در میان فلز و دی الکتریک است تبدیل می شوند، در این موجبر، تلفات انتشاری نسبت به [4] در عرض باند انتشار تک مد کاهش یافته است. همچنین با استفاده از روابط همگن سازی در [2] می توان موجبر با ساختار ناهمسانگرد و ناهمگن را به ساختاری ناهمسانگرد و همگن تبدیل کرد. در این ساختار همگن برخی از مشخصه های 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 راحت تر است.

مرجع ها

- [1] 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. Kuhlmeier, "Low loss and single mode metal dielectric hybrid-clad waveguides for Terahertz radiation," in *SPIE Micro+Nano Materials, Devices, and Applications*, p. 8, 2015.

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 شکل های ۴ و ۵ ضریب شکست موثر و همچنین تلفات انتشاری ساختار همگن در مدهای TM_1 و TM_2 نسبت به ساختار غیر همگن دقیقاً یکسان نیستند اما با این حال روند کلی تغییرات یکسان و مشابه است و می- توان مشخصه های الکترومغناطیسی، مانند ضریب شکست موثر و تلفات انتشاری در ساختار همگن را تقریبی از ساختار غیر همگن در نظر گرفت.



شکل ۴: تغییرات ضریب شکست موثر مدهای TM_1 و TM_2 برای ساختار همگن و ساختار غیر همگن بر حسب فرکانس.

