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 فراماده

**امیررضا روح بخش طیرانی، مهرداد شکوه صارمی**

**گروه مهندسی برق، دانشگاه فردوسی مشهد**

**چکیده- با استفاده از ترکیب فلز-دی‌الکتریک یا فراماده در موجبرهای تراهرتز می‌توان عملکرد این موجبرها را بهبود بخشید. نوع خاصی از فراماده به نام فراماده هذلولی هستند که خاصیت ناهمسانگردی دارند. با استفاده از فراماده هذلولی در موجبرهای هسته توخالی تراهرتز، می‌توان انتشار مدهای مرتبه بالاتر را حذف کرد. در این مقاله ابتدا موجبری هسته توخالی با پوشش فراماده 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 شبیه سازی نسبت به ساختار ناهمگن راحت‌تر است.**

کلید واژه- تراهرتز، موجبر دایروی، فراماده، همگن سازی.

# 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 metamterials, 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.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03 ]

## مقدمه

تراهرتز در محدوده فرکانسی THz (۱۰-۰/۱) قرار می‌گیرد. امواج تراهرتز، امواج ریزموج با طول موج هایی 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 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 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 فراماده

فراماد هذلولی نوع خاصی از فراماد 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 $\overline{\overline{\varepsilon}} = \varepsilon_0[\varepsilon_t(\hat{x}\hat{x}+\hat{y}\hat{y})+\varepsilon_z\,\hat{z}\hat{z}]$ تعریف می‌شود. $t$ و $z$ به ترتیب معادل مولفه‌های عمودی و موازی نسبت به جهت انتشار مدها هستند. اگر $\varepsilon_{xx} \neq \varepsilon_{yy} \neq \varepsilon_{zz}$ در نظر گرفته شود ساختار ناهمسانگرد دو محوری است و اگر $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} \neq \varepsilon_{zz}$ در نظر گرفته شود، ساختار ناهمسانگرد تک محوری است. در چنین محیطی روابط پاشندگی مدهای TE و TM به فرم زیر نوشته می‌شوند [3]:

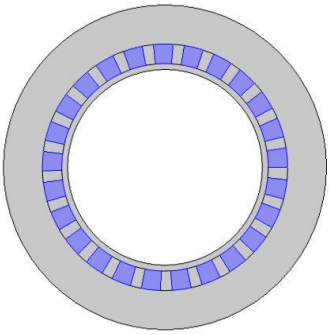
$$\frac{k_t^2}{\varepsilon_t}+\frac{\beta^2}{\varepsilon_t}=k_0^2 \quad ; \quad TE \qquad (۱)$$

$$\frac{k_t^2}{\varepsilon_z}+\frac{\beta^2}{\varepsilon_t}=k_0^2 \quad ; \quad TM \qquad (۲)$$

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.

## مدل‌سازی و طراحی

در مقاله [4] موجبری هسته هوایی با پوسته ترکیبی فلز-دی‌الکتریک (پوسته فراماد) 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 فراماد. (شیارهای آبی رنگ از جنس نقره و شیارهای خاکستری رنگ از جنس COC هستند).

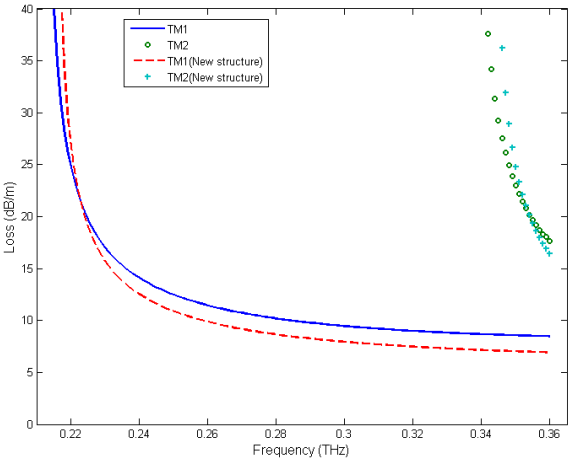
اما برای دستیابی به تلفات انتشاری مطلوب‌تر، تغییراتی مطابق شکل ۱ در ساختار موجبر [4]، ایجاد می‌کنیم. در این ساختار پیشنهادی، سیم‌های فلزی از جنس نقره که هم



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

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03 ]

راستا با طول موجبر هستند به شیارهایی تبدیل می‌شوند 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 می‌گیرند. 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).

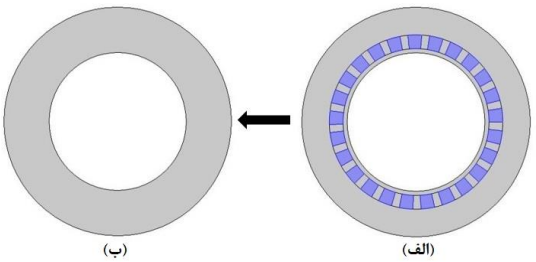
همانطور که از شکل ۲ مشخص است انتشار تک مد مانند [4] در بازه فرکانسی ۰/۲۲ THz تا ۰/۳۴ THz و در عرض باند ۰/۱۲ THz صورت گرفته است. در [4] کمترین تلفات برای مد اصلی $TM_1$ در بازه فرکانسی تک مد در ۰/۳۴ THz برابر با ۸/۶۷ dB/m است. اما در ساختار پیشنهادی، کمترین تلفات انتشاری در بازه فرکانسی تک مد در فرکانس 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 واقع شده‌اند ارائه شده است. با استفاده از این روابط می‌توان ساختاری همگن را معادل ساختار ناهمگن بدست آورد.

$$\varepsilon_{\parallel} = \varepsilon_h \left(1 - \frac{k_p^2}{k^2 + ikk_D}\right) \qquad (۳)$$

$$\varepsilon_{\perp} = \varepsilon_h \left[1 + p\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_h}{\varepsilon_h + (1-p)(\varepsilon_s - \varepsilon_h)\mathrm{N}}\right] \qquad (۴)$$

روابط بالا برای ساختاری که سیم‌هایی فلزی درون ماده میزبان (دی‌الکتریک) واقع شده‌اند، تعریف 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 $N = \frac{1}{2} - \frac{(kr)^2}{3} - j\frac{(kr)^3}{9}$ 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. $\varepsilon_h$ و $\varepsilon_s$ نیز به ترتیب برابر با ثابت دی‌الکتریک محیط میزبان و شیارهای دی‌الکتریک، ثابت دی‌الکتریک شیارهای فلزی واقع شده درون ماده میزبان هستند. همچنین $\rho$ نسبت سطح یا حجم ماده فلزی به ماده دی‌الکتریک در ساختار موجبر است. با اعمال روابط (۳) و (۴) در رابطه $\overline{\overline{\varepsilon}} = \varepsilon_0[\varepsilon_t(\hat{x}\hat{x} + \hat{y}\hat{y}) + \varepsilon_z\,\hat{z}\hat{z}]$ می‌توان ساختار موجبر شکل ۳ (الف) را مطابق شکل ۳ (ب) در نظر گرفت و معادل سازی کرد.




شکل ۳: تبدیل موجبر هسته هوایی با پوسته‌ای غیر همگن به موجبر هسته هوایی با پوسته ای همگن.

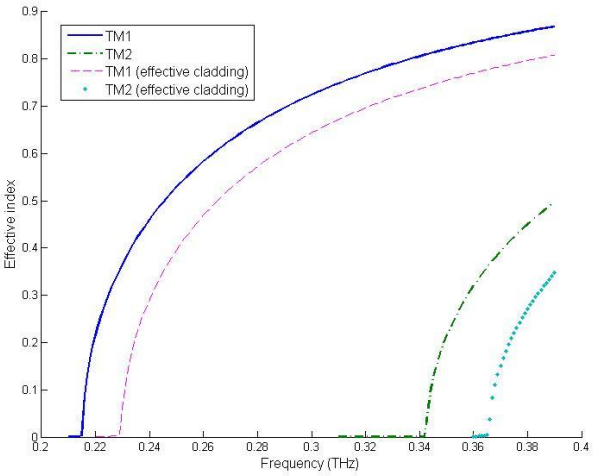


این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

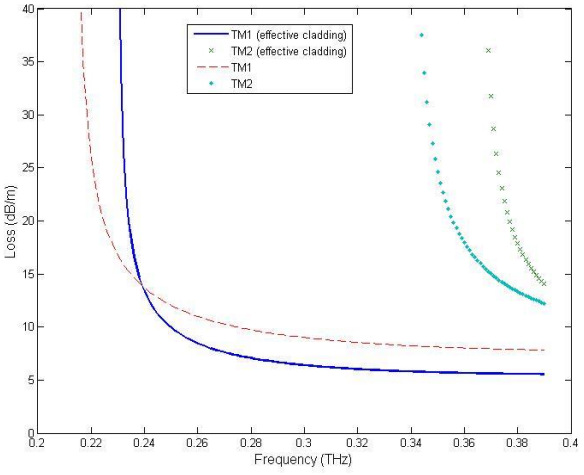
[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03 ]

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 $TM_1$ و $TM_2$ نسبت به ساختار غیر همگن دقیقا یکسان نیستند اما با این حال روند کلی تغییرات یکسان و مشابه است و می‌توان 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 $TM_1$ و $TM_2$ برای ساختار همگن و ساختار غیر همگن بر حسب فرکانس.




شکل۵: تغییرات تلفات انتشاری مدهای $TM_1$ و $TM_2$ برای ساختار همگن و ساختار غیر همگن بر حسب فرکانس.

## نتیجه‌گیری

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 گرفته‌اند. 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

[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. 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.



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

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03 ]