

تحلیل و طراحی تزویج‌کننده هایبرید تریبئی در باند تراهرتز مبتنی بر ساختار موجبری EBG

زهرة برامی^۱، علی غفورزاده یزدی^۲، مسعود موحدی^۳

^۱ کارشناس ارشد مخابرات - میدان، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر،
دانشگاه یزد، Zohre66@gmail.com

^۲ هیأت علمی دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه یزد،
Aghafoorzadeh@yazduni.ac.ir

^۳ هیأت علمی دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه یزد،
Movahhedi@iee.org

چکیده - در این مقاله، یک تزویج‌کننده هایبرید تریبئی در باند فرکانسی تراهرتز و با استفاده از ساختار موجبری EBG، تحلیل و طراحی شده است. در ساختار تزویج‌کننده پیشنهادی، چهار پست فلزی در نظر گرفته شده و محل قرار گرفتن آنها نسبت به چهار پورت به گونه‌ای بهینه‌سازی شده است تا تزویج 3dB و اختلاف فاز 90 درجه در پورتهای خروجی، ایزولاسیون کمتر از 40dB در پورت ایزوله و تطبیق در تمام پورتهای حاصل شود. علاوه بر این، با استفاده از موجبرهای فلزی مرسوم، تزویج‌کننده مذکور مجدداً طراحی و تحلیل شده و نتایج حاصل از آن با نتایج تزویج‌کننده پیشنهادی مقایسه شده است. تطابق خوب نتایج نسبت به هم حاکی از آن است که ساختارهای متناوب EBG به نحو مطلوب می‌توانند دیواره‌های جانبی موجبرهای فلزی را شبیه‌سازی کرده و جایگزین مناسبی برای آنها باشند. تمام مراحل تحلیل، طراحی و بهینه‌سازی پارامترها توسط نسخه 13 نرم افزار HFSS انجام شده است. کلید واژه - تراهرتز، ساختار EBG، هایبرید تریبئی.

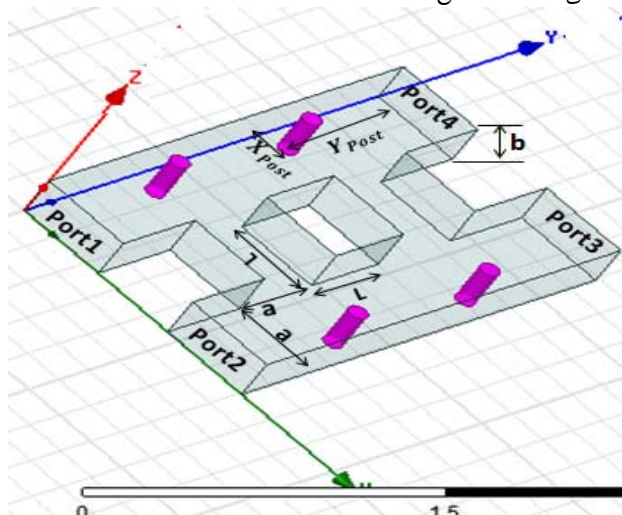
1- مقدمه

به شمار می‌آید [5-7]. میکروماشین-کاری بر مبنای سیلیکون می‌تواند به حل این مشکل کمک کند. موجبرها توسط ماشین‌های فرزکاری و مته‌کاری معمولی ساخته می‌شوند. روش‌های ماشین‌کاری بر مبنای سیلیکون قادر به دستیابی به اندازه‌هایی در حد میکرون و نیز کنترل فرآیند بسیار عالی مانند یکنواختی و کیفیت سطح بالا، می‌باشند. شایان ذکر است که در فرکانس‌های بالای 500GHz موجبرها بسیار کوچک هستند (کوچکتر از 0.3 mm تا 0.15 mm). از اینرو استفاده از تکنیک‌های ماشین‌کاری معمولی برای ساخت آنها بسیار مشکل بوده و هزینه زیادی دارد [3]. برای غلبه بر این مشکلات، تحقق موجبرها مبتنی بر ساختارهای EBG^۱ به عنوان یک جایگزین کم هزینه و کم تلف، مطرح شده است. با توجه به اینکه در محدوده امواج تراهرتز با ابعاد

امروزه توجه زیادی به محدوده فرکانسی امواج میلی‌متری و زیرمیلی-متری می‌شود. این باند فرکانسی کاربردهای متنوعی در فضا، رادار، پزشکی، تصویربرداری تراهرتز و غیره دارد [1-2]. باند تراهرتز در محدوده فرکانسی 300GHz تا 3THz تعریف شده است. این محدوده فرکانسی مربوط به طول موج‌های 1mm تا 100µm می‌باشد [3]. به عبارت دیگر، تراهرتز بخشی از طیف فرکانسی امواج الکترومغناطیس است که بین فرکانس‌های مایکروویو و طیف امواج نوری قرار دارد. به دلیل وجود مشکلات عملی، تا چند سال گذشته، تقریباً این طیف فرکانسی به صورت کاربردی مورد استفاده قرار نمی‌گرفته است [4]. به علت افزایش تلفات عایقی در محدوده فرکانسی امواج زیر میلی‌متری، معمولاً در باند تراهرتز از موجبرهای توخالی استفاده می‌شود. ولی ساخت اینگونه موجبرها به دلیل ابعاد میکرومتری و کوچکی که دارند، مشکل بوده و از چالش‌های مهم تحقق آنها

^۱ . Electromagnetic Band Gap

یکپارچه، مجتمع می‌شوند. بنابراین از ساختارهای موجبری EBG که با استفاده از فناوری MEMS، با دقت یک میکرومتر، محقق می‌شوند برای ساخت اتصالات هایبرید در محدوده فرکانسی تراهرتز استفاده می‌شود. ساختار هندسی هایبرید تریبیعی مرسوم که مبتنی بر موجبر فلزی می‌باشد، در شکل 1 نشان داده شده است.



شکل 1- ساختار هندسی هایبرید مبتنی بر موجبر فلزی

3- طراحی و تحلیل

همانطور که در شکل 1 دیده می‌شود در ساختار هایبرید از موجبرهای فلزی با ابعاد $a=480\mu\text{m}$ و $b=240\mu\text{m}$ استفاده شده است. فرکانس قطع این موجبر برای انتشار مد غالب TE_{10} ، برابر $312/5$ گیگاهرتز می‌باشد. چهار پست³ فلزی در ساختار هایبرید جهت کنترل تزویج در پورت‌های خروجی و ایزولاسیون در پورت ایزوله، قرار داده شده و مکان آن‌ها از طریق نرم‌افزار حل‌کننده تمام موج HFSS، بهینه‌سازی شده است. قطر پست‌های فلزی که در شکل 1 با d_{post} نمایش داده شده، $96.4\mu\text{m}$ و طول بازوهای افقی می‌باشد. $L = \frac{\lambda}{4}$ می‌باشد. مقادیر پارامترهای X_{post} و Y_{post} پس از بهینه‌سازی به ترتیب

میکرومتری سروکار داریم، معمولاً از فناوری MEMS² برای ساخت این گونه موجبرها با دقت یک میکرومتر استفاده می‌شود. در مرجع [8] برای ساخت راحت‌تر موجبرهای بانده تراهرتز از ساختار پریودی EBG استفاده شده است. برای تحقق این ساختار، از یک لایه سیلیکون که روی صفحه زمین قرار دارد استفاده شده است. سپس با استفاده از فناوری MEMS قسمت‌هایی از این لایه برداشته شده، به گونه‌ای که جای خالی آن یک موجبر توخالی به وجود آمده است. سپس دو صفحه فلزی در بالا و پایین لایه سیلیکون قرار داده شده و توسط میله‌های فلزی به هم متصل می‌شوند. میله‌های فلزی در دو یا سه ردیف به صورت پریودیک طوری کنار هم قرار گرفته‌اند و ساختار EBG را به وجود آورده‌اند که دیواره‌های فلزی کناری موجبرها، شبیه‌سازی شده‌اند. موجبرهای تراهرتز مبتنی بر ساختار EBG فقط دو دیواره فلزی دارند در حالی که موجبرهای فلزی معمولی دارای چهار دیواره فلزی هستند. هدف از این تحقیق، تحلیل و بررسی یک تزویج‌کننده هایبرید مبتنی بر ساختار موجبری EBG در محدوده فرکانسی امواج تراهرتز می‌باشد.

2- تزویج‌کننده هایبرید

هایبریدها شبکه‌های چهاردهانه‌ای هستند که معمولاً توان ورودی را به نسبت مساوی بین خروجی مستقیم و خروجی تزویج‌شده تقسیم می‌کنند. علاوه بر این، در اتصالات هایبرید عموماً یک اختلاف فاز 90 درجه یا 180 درجه بین دهانه‌های خروجی نیز وجود دارد [9]. تحقق اتصالات هایبرید مبتنی بر موجبرهای مستطیلی فلزی در بانده تراهرتز نه تنها به یک فناوری با هزینه نسبتاً بالایی احتیاج دارند بلکه به سختی با مدارهای صفحه‌ای

³.Post

². Micro-Electro-Mechanical Systems

0.128mm و 0.743mm به دست آمده اند.

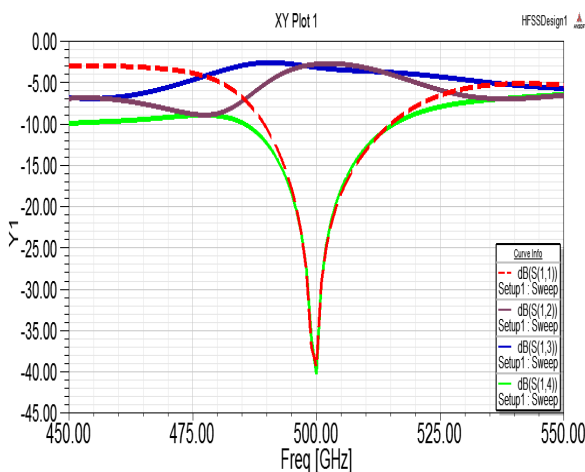
در شکل 2 پارامترهای پراکنندگی تزویج کننده پس از شبیه سازی این ساختار و تحلیل آن با نرم افزار HFSS، ارائه شده اند. این شکل بیانگر تلفات بازگشتی -40dB در پورت ورودی، تزویج 3dB در پورت های خروجی 2 و 3 و نیز ایزولاسیون -40dB در پورت 4، در فرکانس 500GHz است. در این ساختار پهنای باند ورودی کمتر از -20dB در فرکانس مرکزی 1.6% است و پهنای باند ایزوله کمتر از -20dB در فرکانس 500 گیگاهرتز 1.6% است. شکل 3 نیز اختلاف فاز 90 درجه بین پورت های خروجی 2 و 3 را نشان می دهد. که در این شکل پهنای باند با تلورانس 10 درجه 6.14% است.

در مرحله بعد، یک تزویج کننده هایپرید مبتنی بر ساختار موجبری EBG که قبلاً در خصوص چگونگی تحقق آن توضیح داده شد، شبیه سازی و تحلیل شده است. همانطور که در شکل 4 مشخص است دو ردیف میلله های فلزی استوانه ای شکل جایگزین دیواره های فلزی جانبی موجبر شده و نقش ساختار EBG و عدم انتشار موج به طرفین ساختار را بازی می کنند. پارامترهای استوانه های فلزی به کار رفته در ساختار EBG عبارتند از: $d_{via}=48\mu m$ (شعاع استوانه ها) و $c=192\mu m$ (فاصله بین دو مرکز استوانه ها). به عبارت دیگر، فاصله بین دو مرکز استوانه ها چهار برابر شعاع ($c=4d_{via}$) در نظر گرفته شده است.

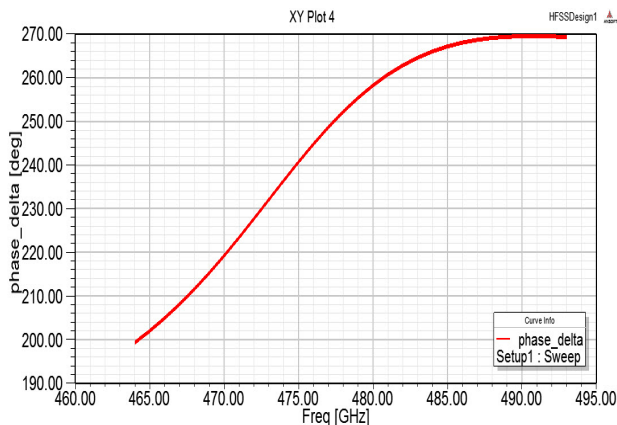
پارامترهای پراکنندگی مربوط به تزویج کننده هایپرید مبتنی بر ساختار موجبری EBG، در شکل 5 نشان داده شده اند. مقایسه نمودارهای مندرج در شکل های 2 و 5 به وضوح نشان می دهد که ساختار متناوب EBG خوبی می تواند دیواره های فلزی جانبی موجبر را شبیه سازی کند. همچنین پهنای باند ورودی کمتر از -20dB در فرکانس مرکزی برای این ساختار 1.4% و پهنای باند ایزوله کمتر از -20dB برابر با 1.2% می باشد. بعلاوه، در مشخصه های فرکانسی ساختارهای مورد بحث یک شیفت فرکانسی از 500 گیگاهرتز به 491 گیگاهرتز دیده می شود که بیانگر تفاوت های فیزیکی و

الکترومغناطیسی می باشد که بین ساختارها وجود دارد. شکل 6 نیز اختلاف فاز بین پورت های خروجی را نمایش می دهد. همانطور که در این شکل مشخص است اختلاف فاز بین پورت های خروجی در این ساختار 270 درجه (90- درجه) می باشد و پهنای باند آن با تلورانس 10 درجه 2.44% می باشد.

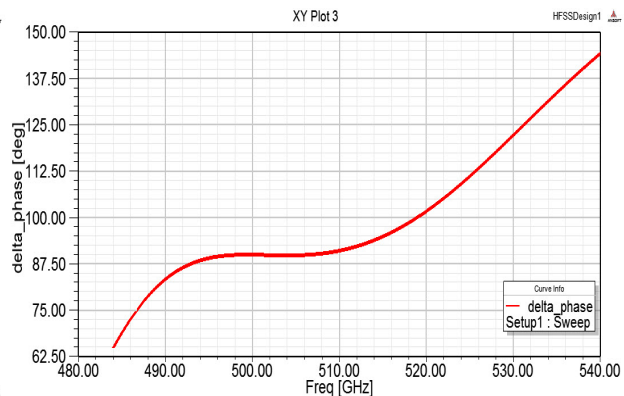
در بخش نهایی تحقیق، ساختارهای EBG یک ردیفه و سه ردیفه در دو مرحله، جایگزین حالت دو ردیفه آن شده و تحلیل های مشابه در ساختارهای جدید انجام شده است. نکته جالب توجه این است که ساختار یک ردیفه EBG نمی تواند در محدوده فرکانسی مورد نظر، باند ممنوعه الکترومغناطیس را به طور مطلوب ایجاد کرده و جایگزین مناسبی برای دیواره های فلزی موجبر باشد. لازم به ذکر است که در محدوده امواج میلی متری و در فرکانس هایی که تلفات عایقی کم و قابل صرف نظر باشد با استفاده از ساختار یک ردیفه EBG نیز می توان بسیاری از ادوات پسیو مایکروویو را تحقق بخشید. به این روش، فناوری موجبرهای مجتمع شده در زیرلایه (SIW) می گویند. در حالت ساختار EBG سه ردیفه، نتایج با تقریب خوبی مشابه با حالت دو ردیفه بوده و تنها نکته ی حائز اهمیت و نامطلوب، صرف وقت بیشتر جهت شبیه سازی و محاسبات کامپیوتری بوده است.



شکل 2- پارامترهای پراکنندگی هایپرید مبتنی بر موجبر فلزی



شکل 6- اختلاف فاز 270 درجه بین پورت‌های خروجی 2 و 3 در هایپرید مبتنی بر ساختار موجری EBG



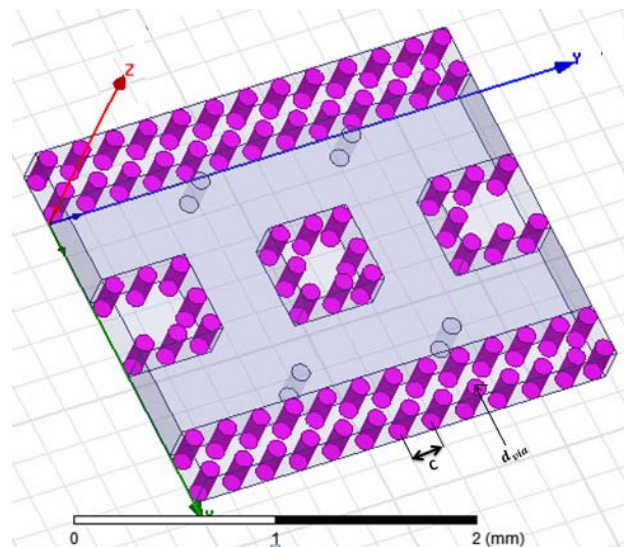
شکل 3- اختلاف فاز 90 درجه بین پورت‌های خروجی 2 و 3 در هایپرید مبتنی بر موجری فلزی

4- نتیجه‌گیری

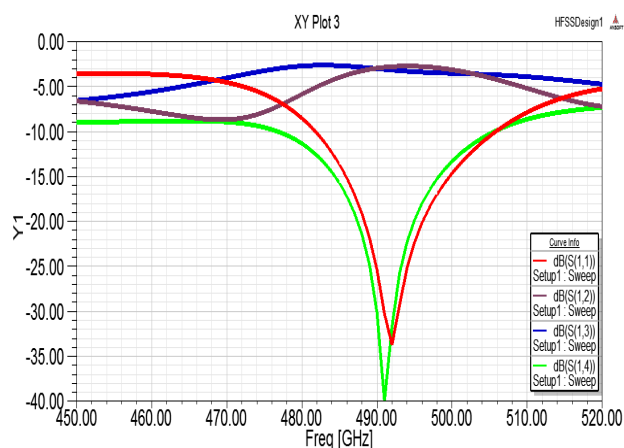
در این تحقیق، ابتدا یک تزویج-کننده هیپرید تریبوسی در باندهای فرکانسی تراهرتز بر اساس موجرهای فلزی مرسوم طراحی شده است. به منظور دستیابی به تطبیق خوب در ورودی، ایزولاسیون مناسب در پورت ایزوله و تزویج توان 3dB در خروجی‌ها، کنار هر کدام از چهار پورت تزویج‌کننده یک پست فلزی قرار داده شده و مکان آن‌ها بهینه‌سازی شده است. در مرحله بعد، به منظور تسهیل در ساخت تزویج‌کننده موجری و همچنین ایجاد قابلیت مجتمع شدن با مدارهای مجتمع یکپارچه، دیواره‌های جانبی موجری فلزی با ساختارهای متناوب EBG جایگزین شده است. با استفاده از فناوری MEMS می‌توان ساختار پیشنهادی را با دقت یک میکرومتر تحقق بخشید. نتایج حاصل از تحلیل نشان می‌دهد که در باندهای فرکانسی تراهرتز، دو ردیف ساختار EBG می‌تواند با دقت خوبی دیواره‌های موجری فلزی را شبیه‌سازی کرده و گزینه مناسبی برای تحقق ادوات پس‌یو در محدوده امواج زیرمیلی‌متری باشد.

مراجع

- [1] Siegel, Peter H., "Terahertz technology," Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on 50., PP: 910-9283, 2002.
- [2] de Maagt, Peter, and Janet Chariton. "Terahertz space applications and technology." *Microwave Symposium Digest, 2005 IEEE MTT-S International*. IEEE, 2005.
- [3] Becker, J. P., J. R. East, and L. P. B. Katehi. "Performance of silicon micromachined waveguide at W-band." *Electronics Letters* 38.13 (2002): 638-639.



شکل 4- تزویج‌کننده هایپرید تراهرتز مبتنی بر ساختار موجری EBG



شکل 5- پارامترهای پراکندگی هایپرید مبتنی بر ساختار موجری EBG

- [4] A. Rostami, H. Rasooli and H. Baghban, "Terahertz Technology," Vol. 77, Springer 2011.
- [5] م. رادفر، "تحليل موجبرهاي باند تراهرتز"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، گروه مهندسی برق و کامپیوتر، 1389.
- [6] م. احمدی بروجنی، "تجزیه و تحلیل موجبرهاي تراهرتز مبتني بر ساختارهاي متناوب"، رساله دکتری، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، 1390.
- [7] Wu. Ziran et al., "Investigation of several terahertz electromagnetic band gap structures," *Microwave and Optical Technology Letters* 52.3, PP: 678-686., 2010.
- [8] Liu. Yong et al., "Design of 0.5 THz 2D square lattice EBG waveguide transmission line 0and power-divider using MEMS technology," *International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2009*.
- [9] P. David M., "Microwave engineering. Wiley," 2009.