

طراحی کوپلر جهتی موجبری بر اساس ساختار موجبر مجتمع درون زیرلایه

زهره پورغلامحسین^(۱) - رضا صفیان^(۲)

(۱) کارشناس ارشد - پژوهشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات، دانشگاه صنعتی اصفهان

(۲) استادیار - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان

تاریخ دریافت: پاییز ۱۳۸۹ تاریخ پذیرش: تابستان ۱۳۹۰

خلاصه: موجبر مجتمع درون زیرلایه (SIW) مدل جدیدی از ساختار موجبری است که می‌تواند در مدارات مجتمع مایکروویو و موج‌میلیمتری پیاده‌سازی شود. در این مقاله یک کوپلر جهتی موجبری دو لایه بر اساس ساختار SIW پیشنهاد می‌شود. فرایند طراحی بر مبنای تئوری کوپلینگ و روش چبی‌شف می‌باشد. این ساختار پیشنهادی از ساختار مایکرواستریپ برای پورت‌های ورودی و خروجی و از ساختار خم برای اعمال بر روی موجبر SIW استفاده می‌کند. بهینه‌سازی خم SIW برای حصول حداقل افت عبوری با استفاده از نرم‌افزار HFSS انجام شده است. فرکانس مرکزی برای طراحی کوپلر 20 dB، 10 GHz است و پهنای باند به دست آمده برای این ساختار 60 درصد می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که مقدار کوپلینگ تقریباً در تمام پهنای باند، با حداقل تغییرات 2 dB ثابت می‌ماند. از طرفی با افزایش تعداد روزنه‌ها، می‌توان به پهنای باند بیشتر دست یافت. همچنین با اضافه کردن یک ردیف از روزنه‌های کوپلینگ، در طرف دیگر دیوار مشترک، دامنه امواج دو برابر می‌شود و مقدار کوپلینگ 6 dB افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: کوپلر موجبری، موجبر مجتمع زیرلایه (SIW)، خم موجبر، روش چبی‌شف.

۱- مقدمه

معمولی معیایی چون اندازه بزرگ و مجتمع‌سازی دشوار دارند. بنابراین مهم است که راه‌حل دیگری در نظر گرفته شود. امروزه بسیاری از طراحی‌های سیستم موج میلیمتری و مایکروویو، مسائل مجتمع‌سازی بین ساختارهای صفحه‌ای و غیرصفحه‌ای را در نظر می‌گیرند [۱ و ۲]. برای تحقق چنین تکنیک‌هایی، ساختارهای مسطح و غیرمسطح، باید روی همان زیرلایه عایق، طراحی و مجتمع شوند به طوری که شکل هندسی غیرمسطح، به شکل مسطح تبدیل شود. یکی از بهترین راه‌حل‌های ارائه شده، استفاده از دو دیوار تناوبی، متشکل از استوانه‌های کوچک اتصال کوتاه درون فیبر مدار چاپی است. این ردیف استوانه اتصال کوتاه، یک دیوار امپدانس به وجود می‌آورد و با تنظیم محل آن می‌توان یک موجبر مستطیلی را درون عایق مدار چاپی ایجاد کرد. این تکنولوژی که به موجبر مجتمع درون زیرلایه^۲ (SIW) شهرت یافته، راه را برای مجتمع ساختن و اتصال بسیار ساده و کم اتلاف هموار می‌سازد. تاکنون بسیاری از ادوات مایکروویو موجبری مانند فیلتر [۳] و تقسیم‌کننده توان [۴]، آنتن [۵]، کوپلر [۶] با موفقیت به وسیله SIW پیاده‌سازی و ساخته شده است. بنابراین مفهوم SIW این امکان را فراهم می‌سازد که موجبر در روی زیرلایه

پیشرفت مدارات مجتمع مایکروویو با هدف کاهش اندازه مدار و همچنین افزایش تراکم مجتمع‌سازی می‌باشد. در این حالت توپولوژی‌های مدار صفحه‌ای، راه اصلی برای حصول این اهداف را فراهم می‌کند. در این صورت ممکن است به شکل خط مایکرواستریپ، موجبر هم‌صفحه^۱ (CPW)، خط شیاردار یا انواع دیگر باشد. اگرچه، این خطوط صفحه‌ای دارای افت هادی زیاد به علت چگالی جریان زیاد در امتداد لبه‌های باز خط هستند. به علاوه این مدارات، شامل تعداد زیادی ناپیوستگی خط می‌باشند که امکان افت تشعشعی زیاد و تزویج متقابل وجود دارد. همچنین ممکن است مودهای زیرلایه و دیگر اثرات نامطلوب پدیدار شود. بنابراین ساختارهای مسطح برای هر طراحی مداری مناسب نیستند. به طور کلی موجبرها برای انتقال توان الکترومغناطیسی از یک نقطه در فضا به نقطه دیگر استفاده می‌شوند. به عبارت دیگر تکنیک‌های موجبر کلاسیک هنوز هم به طور وسیعی کاربرد دارند. زیرا دارای مشخصه افت کم و بدون تزویج هستند. موجبرهای مستطیلی نقش مهمی را در تحقق عملکرد بالای قطعات غیرفعال RF به علت داشتن ضریب کیفیت بالا و ظرفیت توان بالا ایفا می‌کنند. ولی موجبرهای

به این ترتیب تاکنون کوپلرهای متعددی طراحی و ساخته شده‌اند. هدف این مقاله، طراحی کوپلر جهتی موجبری مبتنی بر ساختار SIW، در باند X و مقدار کوپلینگ ضعیف^۶ (20 dB)، می‌باشد به طوری که مشخصه ایزولاسیون آن در یک باند وسیع تغییرات یکسان داشته باشد. برای دستیابی به یک باند عبور بسیار وسیع، از روش چبی شف برای طراحی استفاده خواهیم کرد. ساختار پیشنهادی دارای اندازه کوچک و حجم کمی است. کوپلینگ بین دو لایه موجبر از طریق روزنه‌هایی بر روی دیوار مشترک محقق می‌شود. در طراحی این کوپلر از ساختار خم^۷ و برای تغذیه از خط مایکرواستریپ استفاده شده است. در بخش دوم پارامترهای ساختار SIW را معرفی و روند طراحی کوپلر پیشنهادی بر اساس این ساختار را بیان می‌کنیم. سپس به طراحی کوپلینگ با روش چبی شف پرداخته و در نهایت نتایج حاصل از شبیه‌سازی ساختار کوپلر نهایی را نشان خواهیم داد.

۲- کوپلر موجبری SIW

یک کوپلر جهتی، شبکه‌ای چهار پورته است که در آن بخش‌هایی از امواج متحرک پیشرو و پسرو روی یک خط به‌طور جداگانه به دو پورت تزویج می‌شوند. در معمول‌ترین شکل، کوپلر جهتی شامل دو خط انتقال و یک مکانیزم برای تزویج سیگنال بین آنها می‌باشد. شکل (۱) شماتیکی از یک کوپلر جهتی را نشان می‌دهد. این کوپلر جهتی در حالت ایده‌آل دارای این خاصیت است که موج تابشی به پورت ۱ (پورت ورودی) به پورت‌های ۲ (پورت عبوری) و ۳ (پورت کوپلینگ) تزویج می‌گردد ولی به پورت ۴ (پورت ایزوله) تزویج نمی‌شود.

۲-۱- پارامترهای طراحی SIW

موجبر SIW، با قراردادن دو ردیف حفره‌های استوانه‌ای فلزی در یک زیر لایه عایقی که با دو صفحه فلزی پوشیده است محقق می‌شود (شکل (۲)). این دو ردیف استوانه‌های فلزی نقش همان دیواره‌های موجبر مستطیلی معمولی را ایفا می‌کنند. قطر این حفره‌ها d، فاصله بین هر دو حفره در یک ردیف p و فاصله بین دو ردیف w، پارامترهای فیزیکی هستند که در نظر گرفتن آنها در طراحی‌ها برای کارکرد دلخواه SIW لازم است. پارامترهای طراحی با استفاده از [۱۵] به دست می‌آیند. در واقع SIW می‌تواند با تئوری موجبری تحلیل شود، در صورتی که از پهنای معادل استفاده کنیم، پهنای معادل از SIW و موجبر مستطیلی معمولی با استفاده از روش FDFD^۸ به دست می‌آید [۱۶]. از طرفی مد غالب در این ساختار TE₁₀ می‌باشد. در این مقاله ساختار روی زیرلایه RT/duroid 6010 با ثابت دی‌الکتریک 10.2، ضخامت 25 mil و $\tan\delta = 0.0023$ (در فرکانس 10 گیگاهرتز) طراحی شده است. پهنای موجبر معادل $W_{SIW} = 7.2\text{mm}$ ، قطر حفره‌ها $d = 0.9\text{mm}$ و فاصله مرکز تا مرکز بین هر دو حفره مجاور $P = 1.5\text{mm}$ می‌باشد.

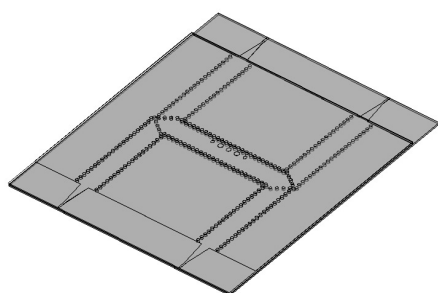
مجتمع مدارات موج‌میلیمتری و مایکروویوی ساخته شود. تکنولوژی SIW نویدبخش انواع مدارات و قطعاتی است که در مایکروویو، موج‌میلیمتری و تراهرتز عمل می‌کنند.

از طرفی طراحی و ساخت زیر سیستم‌های مخابراتی و دستگاههای مورد استفاده در فرکانس‌های مایکروویو، از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشد. یکی از ادوات غیرفعال از این دسته که دارای کاربرد زیادی می‌باشد، کوپلر است. کوپلرهای جهتی^۹ مایکروویو، کاربرد گسترده‌ای در اکثر سیستم‌های مایکروویو، RF، رادار و سیستم‌های اندازه‌گیری دارند. پهنای باند و اندازه دو پارامتر مهم در مشخصات کوپلرها هستند. یک کوپلر بهم فشرده باعث صرفه‌جویی در فضا و کاهش افت فلز می‌شود. کوپلرهای جهتی یک شبکه چهار پورته هستند که می‌توانند در اشکال مختلفی به کار روند. در طراحی کوپلرها از موجبرها یا خطوط انتقال صفحه‌ای استفاده می‌شود که شامل کوپلرهای جهتی موجبری، اتصالات هاب‌برید، کوپلرهای جهتی انشعاب-خط^{۱۰}، کوپلر خط نواری هم‌صفحه می‌باشد.

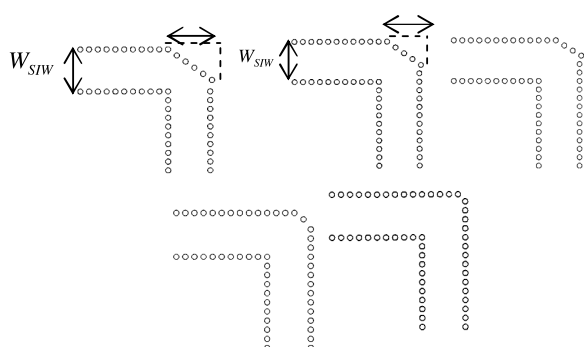
با توجه به توضیحات داده شده، یک طراحی مناسب برای کوپلر باید دارای پهنای باند وسیع، افت عبوری کم، عدم حساسیت کوپلینگ به تغییرات فرکانس، دارا بودن مقدار ایزولاسیون بسیار بالا در پورت ایزوله و داشتن افت برگشتی^۵ مناسب، بیشتر از حداقل 10 dB باشد. بنابراین تلاش‌های بسیاری در زمینه طراحی و ساخت کوپلرهای موجبری، که حتی‌الامکان بعضی خصوصیات فوق را برآورده سازند، در باندهای فرکانسی متفاوت صورت گرفته است که البته بستگی به کاربرد مورد نظر طراح دارد. در [۷] یک کوپلر جهتی یک لایه با مقادیر کوپلینگ 3 dB، 6 dB و 10 dB، بر اساس SIW ساخته شد که دارای پهنای باند محدودی بود. در [۸] کوپلر 3 dB دیگری به شکل صلیبی در فرکانس 24 گیگاهرتز، باند Ka، طراحی شد که پهنای باند آن 18٪ و مقدار ایزولاسیون بالاتر از 14 dB به دست آمد. در [۹] یک ساختار کوپلر جهتی دو لایه با استفاده از دو SIW متقاطع نسبت به یکدیگر، در باند فرکانسی Ku، در فرکانس مرکزی 16 گیگاهرتز طراحی گردید و پهنای باند آن 36 درصد به دست آمد. در [۱۰] کوپلر جهتی دو بانده در باند فرکانسی K با مقادیر کوپلینگ 20 dB و 6 dB طراحی گردید. در [۱۱] کوپلر 7 dB در باند Ka طراحی شد، مقدار ایزولاسیون بزرگتر از 18 dB در رنج فرکانسی 30.55-31.2 گیگاهرتز و افت برگشتی بیشتر از 10 dB در رنج فرکانسی 30.3-31.4 گیگاهرتز حاصل شد. در [۱۲] کوپلر موجبری دیگری با استفاده از ساختار SIW در باند فرکانسی Ka طراحی گردید. این کوپلر به عنوان تقسیم‌کننده توان 3 dB و 4.78 dB استفاده می‌شود. عملکرد این کوپلر تقسیم‌کننده توان تقریباً در تمام باند فرکانسی تغییرات ثابتی داشت. در [۱۳] کوپلر 3 dB دیگری در باندهای K و Ku طراحی شد. پهنای باند برای باند K، 22 درصد و افت برگشتی بیشتر از 15 dB و ایزولاسیون بزرگتر از 14 dB، برای باند Ku، 14٪ پهنای باند و مقدار افت برگشتی بیشتر از 21 dB و ایزولاسیون بزرگتر از 16 dB به دست آمد.

۲-۲- روند طراحی کوپلر SIW

مبنای طراحی کوپلر SIW در این جا بر اساس روش چپی شلف از درجه N می باشد. ساختار کوپلر متشکل از دو لایه دی الکتریک با N+1 سوراخ به فاصله های $\lambda_g/4$ از یکدیگر بر روی سطح فلزی در دیوار مشترک می باشد. شکل (۳) نمایی از ساختار کوپلر پیشنهادی را نشان می دهد. در این ساختار به دلیل اینکه دو پورت میکرواستریپی برای موجبرهای بالا و پایین نمی توانند بر روی یکدیگر قرار گیرند از ساختار خم استفاده می شود. معمولاً خمها برای تغییر جهت انتشار در یک سیستم موجبری استفاده می شود. خمهای موجبر مستطیلی به طور وسیعی در بسیاری از ادوات میکروویو مانند مبدل های موج، تقسیم کننده توان، جستجوکننده رادار و ... استفاده می شوند [۱۷]. در این جا می خواهیم خم موجبری را بر روی ساختار SIW اعمال کنیم. بنابراین در ابتدا به طراحی خم SIW پرداخته می شود. سپس مشخصه انتشاری خم SIW را بررسی کرده و با مشخصه انتشار خم موجبر معمولی مقایسه می کنیم. در طراحی خم موجبری دو مسئله را باید در نظر گرفت. ۱- حداقل کردن افت برگشتی خم در باند وسیعی از فرکانس ۲- حداقل کردن اندازه خم. بنابراین در اینجا برای ایجاد خم مناسب در ساختار کوپلر SIW، ابتدا باید مقدار بهینه برای ایجاد خم در ساختار را به دست آوریم. به عبارتی مقدار بهینه زمانی حاصل می شود که افت برگشتی SIW دارای خم، حداقل شود به این دلیل ساختارهای مختلف از خم 90 درجه (شکل (۴)) را در اینجا بررسی می کنیم و خمی را که حداقل افت برگشتی دارد انتخاب می کنیم.

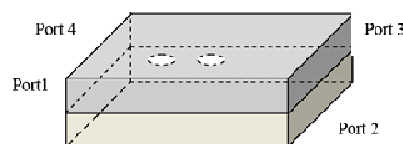


شکل (۳): ساختار کوپلر موجبری SIW پیشنهادی
Fig. (3): Proposed waveguide coupler SIW structure

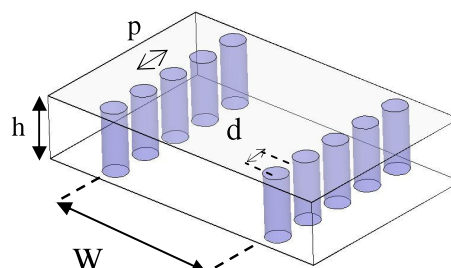


شکل (۴): انواع خم 90 درجه
Fig. (4): Types of 90 degree bend

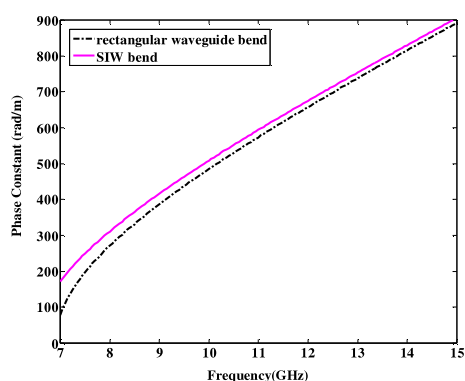
نتایج حاصل از شبیه سازی با نرم افزار HFSS به ازای نسبت های مختلفی از $\frac{C}{W_{SIW}}$ در شکل (۵) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود به ازای $\frac{C}{W_{SIW}} = 0.79$ مقدار افت برگشتی در پهنای باند وسیعی بیشتر از 15 dB به دست می آید و مقدار افت عبوری کمتر از 1.2 dB می باشد. برای مقایسه ثابت انتشار، دو ساختار خم SIW و خم موجبر معادل را در باند X بررسی می کنیم. شکل (۶- الف) نمایی از ساختار یک SIW خم شده را نمایش می دهد. پهنای معادل SIW برابر 6.8 mm می باشد. نتایج شبیه سازی در شکل (۷) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود دو ساختار مشخصه انتشاری یکسان دارند. شکل (۸) افت عبوری این دو خم را نشان می دهد.



شکل (۱): ساختار کوپلر جهتی موجبری [۱۴].
Fig. (1): Waveguide coupler structure

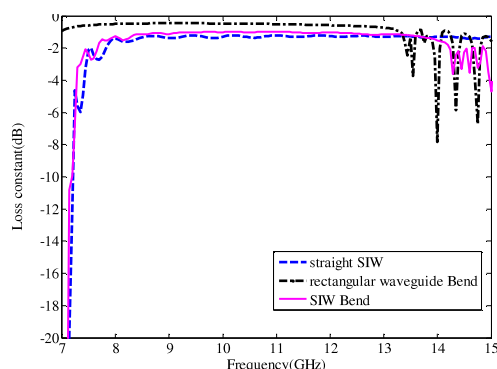


شکل (۲): ساختار موجبر SIW و پارامترهای هندسی آن [۱۵]
Fig. (2): SIW structure and geometric parameters



شکل (۷): مشخصه انتشار خم SIW و خم موجبری

Fig. (7): Propagation constant of the SIW bend and waveguide bend

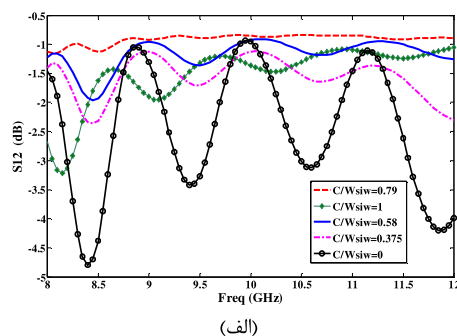


شکل (۸): افت عبوری SIW، خم SIW و خم موجبری

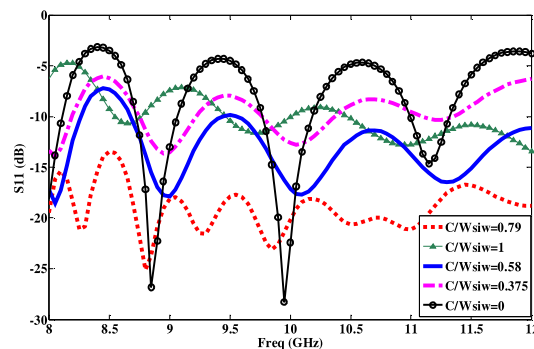
Fig. (8): Insertion loss of the SIW bend and waveguide bend

۲-۳- اتصال SIW به خط میکرواستریپ

تمامی ساختارهایی که بر اساس SIW پیاده‌سازی می‌شوند باید به گونه‌ای مناسب تغذیه شوند. این تغذیه عمدتاً از طریق خط میکرو استریپ صورت می‌گیرد. در مجتمع‌سازی خط میکرواستریپ مسطح به موجبر مستطیلی، دو ساختار غیرمشابه در یک راستا قرار می‌گیرند. این ساختار، از اتصال یک خط میکرواستریپ باریک شده برای تحریک مود موجبر استفاده می‌کند. برای طراحی خط انتقال هدف به دست آوردن مقدار افت برگشتی بهینه می‌باشد. در این قسمت فقط یک خط SIW را بدون اعمال ساختار کوپلری در نظر گرفته و مقدار بهینه را به دست می‌آوریم. شکل (۹-الف)، خط انتقال بیان شده از خط میکرو استریپ به موجبر مستطیلی در همان زیرلایه دی‌الکتریکی را نشان می‌دهد. این ساختار از یک خط میکرواستریپ باریک شده^۱ متصل به خط میکرواستریپ 50 اهمی و SIW تشکیل شده است [۱۸]. به عبارتی اتصال یک خط میکرواستریپ با SIW به سادگی با تغییر عرض در خط میکرواستریپ انجام می‌شود. این کار برای تبدیل مود شبه TEM خط میکرواستریپ به مود TE₁₀ موجبر SIW صورت می‌گیرد. تبدیل از خط میکرواستریپ به SIW باید طوری طراحی شود که تطبیق امپدانس موردنظر در ورودی حفظ شود. عدم تطبیق امپدانس در این تبدیل باعث افزایش افت برگشتی (S_{11}) می‌شود.



(الف)

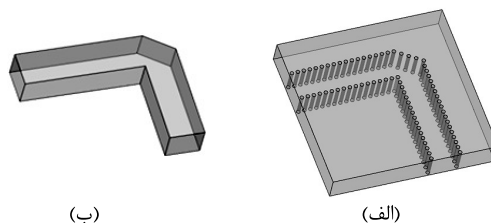


(ب)

شکل (۵): نتایج شبیه‌سازی HFSS ساختار خم (الف) افت عبوری S_{12} (ب) افت برگشتی S_{11}

Fig. (5): Simulated results for bend structure. (a) insertion loss (b) return loss

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود دو ساختار خم، مشخصه افت عبوری یکسانی دارند و بررسی مشخصه مدهای مرتبه بالاتر بر روی دو ساختار SIW معمولی، خم SIW نشان می‌دهد که مدهای بالاتر هم در طول ساختار منتشر می‌شوند. تلفات عبوری سه ساختار فوق در شکل (۸) نشان داده شده است. افت بیک‌ها نشان می‌دهند که مدهای مرتبه بالاتر در ساختار خم SIW به راحتی نسبت به SIW معمولی وارد می‌شوند. به این ترتیب طراحی خم مطلوب انجام می‌شود. حال از آنجا که در ساختار کوپلر از پورت‌های میکرواستریپی استفاده می‌کنیم باید به طراحی خط انتقال بین پورت و خط SIW بپردازیم.



(ب)

(الف)

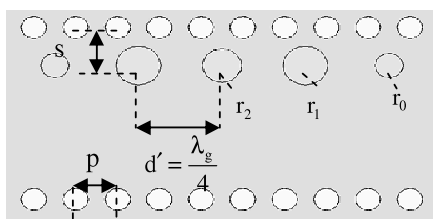
شکل (۶): شماتیک هندسی از (الف) خم SIW (ب) خم موجبر معادل
Fig. (6): The schematic geometry of (a) equivalent waveguide bend (b) SIW bend

مساوی در باند عبور، ضریب آرایه^{۱۱} (۳) متناسب با چند جمله‌ای جیبی شف در نظر گرفته می‌شود.

$$F = \left| \sum_{n=0}^N d_n e^{-j2\beta n d'} \right| \quad (۳)$$

بر اساس آرایه‌های متقارن داریم:

$$F = \left| \sum_{n=0}^M 2d_n \cos(N-2n)\beta d \right| \quad (۴)$$



شکل (۱۰): نمای بالا از ساختار کوپلینگ
Fig. (10): Top view of coupling structure

که در آن $M = (N-1)/2$ برای N فرد و $N/2$ برای N زوج است. حال برای حصول یک پاسخ جیبی شف F را به صورت (۵) بیان می‌کنیم.

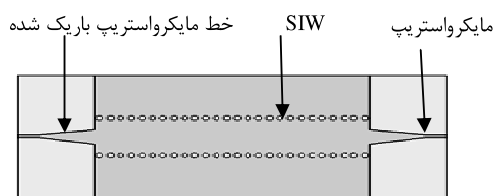
$$F = \left| \sum_{n=0}^M 2d_n \cos(N-2n)\theta \right| = K |T_N(\sec \theta_m \cos \theta)| \quad (۵)$$

ثابت K بر اساس مقدار کوپلینگ مطلوب در مرکز باند به دست می‌آید.

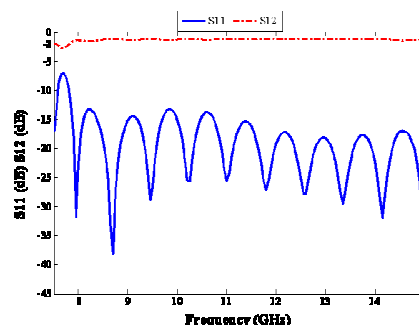
۲-۵- نتایج شبیه‌سازی

به این ترتیب قسمت‌های مختلف ساختار کوپلر را به طور مجزا طراحی و بهینه شده است. حال این نتایج را در کنار هم گذاشته و به شبیه‌سازی کوپلر با استفاده از نرم افزار HFSS می‌پردازیم. شکل (۱۱) نمای بالا از دو لایه پایین و بالای ساختار کوپلر پیشنهادی را نشان می‌دهد. در این ساختار پورت ۱ به عنوان پورت ورودی، پورت ۲ به عنوان پورت عبوری، پورت ۳، پورت کوپلینگ و پورت ۴، پورت ایزوله می‌باشد. پورت‌های ۱ و ۲ بر روی لایه پایینی و پورت‌های ۳ و ۴ بر روی لایه بالایی قرار دارند. در ابتدا یک کوپلر ۴ روزه‌ای، با سوراخ‌های گرد در نظر گرفته. فرکانس مرکزی 10 GHz، مقدار کوپلینگ 20 dB و شعاع روزه‌ها $r_0 = 0.5\text{mm}$ ، $r_1 = 0.8\text{mm}$ ، فاصله بین روزه‌ها 3mm و فاصله از دیوار کناری موجبر $s = 1.4\text{mm}$ می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی در شکل (۱۳) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که کوپلینگ تقریباً در تمام پهنای باند ثابت می‌ماند و کمتر از 2 dB در کل باند تغییر می‌کند. مقدار ایزولاسیون بیشتر از 30 dB به دست آمد. شکل (۱۴) عملکرد یک کوپلر 20 dB، 5 روزه‌ای را نشان می‌دهد. شعاع روزه‌ها $r_0 = 0.5\text{mm}$ ، $r_1 = 0.8\text{mm}$ ، $r_2 = 0.7\text{mm}$ در این حالت با یک روزه اضافی تغییرات کوپلینگ در تمام رنج فرکانسی کمتر از 1 dB و پهنای باند افزایش یافته است. در فرکانس مرکزی 10 GHz، مقدار V_{SWR} کوپلینگ و افت برگشتی (شکل (۱۲))، به ترتیب 1.037، 20.6 dB و 34.82 dB به دست آمد.

نتایج نشان می‌دهند که در یک باند وسیعی مقدار افت عبوری (S_{12})، کمتر از 2 dB و افت برگشتی (S_{11}) بیشتر از 15 dB به دست می‌آید (شکل (۹-ب)).



(الف)



(ب)

شکل (۹): (الف) نمای بالا از خط SIW و اتصال به خط مایکرواستریپ

(ب) نتایج شبیه‌سازی افت برگشتی و افت عبوری ساختار

Fig. (9): (a) Top view of transition structure and SIW (b) simulation results of s_{11} and s_{12}

۲-۴- ساختار کوپلینگ

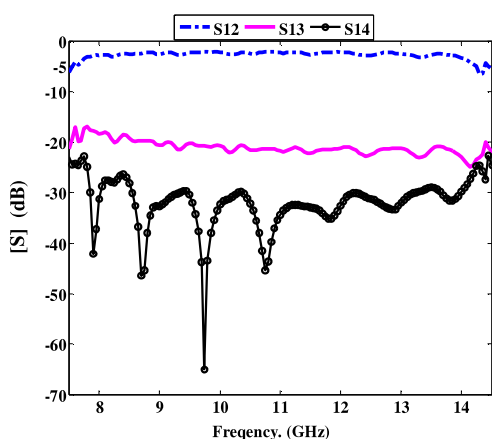
کوپلینگ بین دو لایه موجبر از طریق سوراخ‌هایی بر روی دیوار پهن مشترک تحقق می‌یابد. برای به دست آوردن ایزولاسیون مورد نیاز در تمام پهنای باند از کوپلرهای چندسوراخه استفاده می‌کنند و از آنجا که کوپلری می‌خواهیم که مشخصه ایزولاسیون آن در یک باند فرکانسی وسیعی تغییرات یکسان داشته باشد از روش جیبی شف برای طراحی استفاده می‌کنیم. شکل (۱۰) یک کوپلر با ۵ سوراخ با فواصل مساوی، دو موجبر SIW را تزویج می‌کند. شعاع روزه‌ها بر اساس روش جیبی شف [۱۴]، طراحی می‌شوند. فاصله بین سوراخ‌ها $\lambda_g/4$ در فرکانس طراحی می‌باشد. فاصله روزه‌ها از دیوار کناری چنان تنظیم می‌شوند که توان در پورت ایزوله صفر شود. با استفاده از [۱۴]، داریم:

$$\sin \frac{\pi s}{W} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{6} W} \quad (۱)$$

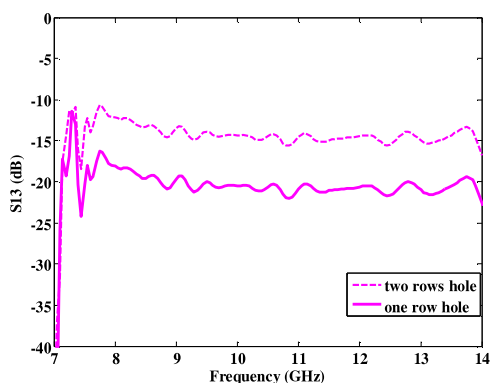
به طور کلی شکل (۱۰) یک کوپلر با $N+1$ روزه را با فواصل مساوی d' را نشان می‌دهد. برای کوپلر روزه‌ای، چند جمله‌ای جیبی شف به صورت (۲) بیان می‌شود.

$$T_N(\sec \theta_m \cos \theta) = T_4(\sec \theta_m \cos \theta) \quad (۲)$$

در این رابطه $\theta = \beta d'$ و $\sec \theta_m$ مقدار $\sec \beta d'$ در لبه‌های بالا و پایین باند عبور می‌باشد. به این ترتیب برای به دست آوردن ریبیل



شکل (۱۴): پارامترهای پراکندگی کوپلر ۵ روزنه‌ای
Fig. (14): Scattering parameters for SIW coupler with 5 holes



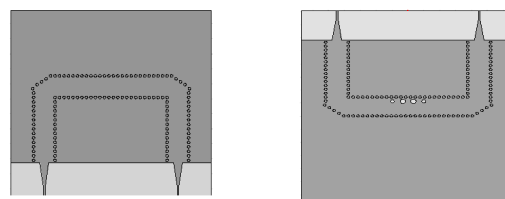
شکل (۱۵): مقایسه مقدار کوپلینگ
Fig. (15): Coupling value Comparison

Table (1): Aperture dimensions
جدول (۱): ابعاد روزنه

شکل	شعاع روزنه‌ها (mm)	مقدار کوپلینگ (dB)	تعداد روزنه‌ها (N+1)
13	$r_0 = 0.5$ $r_1 = 0.8$	20	4
14	$r_0 = 0.5$ $r_1 = 0.8$ $r_2 = 0.7$	20	5

۳- نتایج ساخت کوپلر جهتی SIW پهن باند

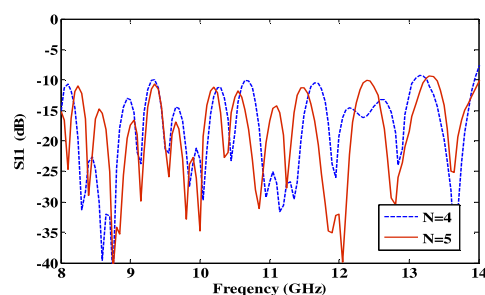
کوپلر نهایی ۵ روزنه‌ای روی زیرلایه RT/duroid 6010 با ثابت دی‌الکتریک ۱۰.۲، ضخامت ۲۵ mil و $\tan \delta = 0.0023$ (در فرکانس ۱۰ گیگاهرتز) ساخته شده است. تصویر کوپلر نهایی به همراه کانکتورهای SMA در دو طرف آن، در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود. برای تست کوپلر (اندازه‌گیری پارامترهای پراکندگی^{۱۲} آن) از تحلیل‌گر شبکه^{۱۳} استفاده گردیده است. شکل (۱۷) اندازه پارامترهای پراکندگی کوپلر حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری را برای مقایسه بهتر نشان می‌دهد. همان‌گونه که از مشاهده می‌شود، سازگاری بالایی بین نتایج تست و شبیه‌سازی کوپلر وجود دارد.



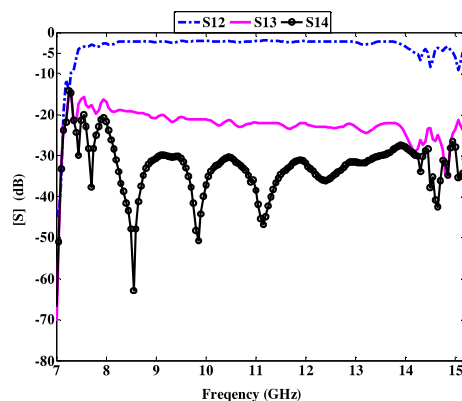
(ب) (الف)

شکل (۱۱): نمای بالا از دو لایه (الف) لایه بالایی (ب) لایه پایینی
Fig. (11): Top view of two layers. (a) Lower layer (b) Top layer

حالت بعدی با اضافه کردن یک ردیف روزنه در طرف دیگر موجبر، مقابل روزنه‌های اول، دامنه امواج تزویج شده دو برابر می‌شود و مقدار کوپلینگ ۶ dB افزایش می‌یابد (شکل (۱۵)). جدول (۱) اندازه شعاع روزنه‌ها را نشان می‌دهد.



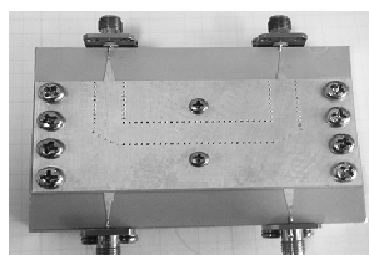
شکل (۱۲): افت برگشتی کوپلر ۴ و ۵ روزنه‌ای
Fig. (12): Return loss of SIW coupler with 4, 5 holes



شکل (۱۳): پارامترهای پراکندگی کوپلر ۴ روزنه‌ای
Fig. (13): Scattering parameters for SIW coupler with 4 holes

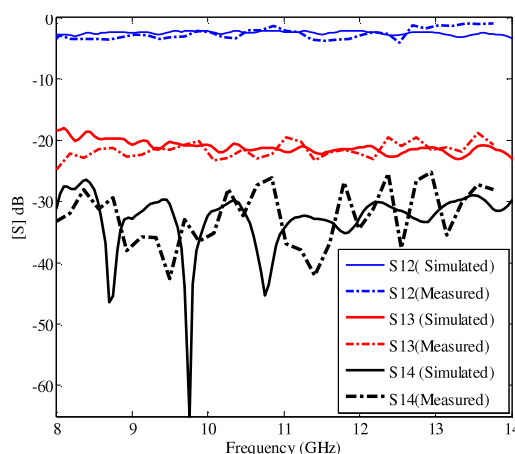
۵- نتیجه گیری

در این مقاله به طراحی کوپلر جهتی موجبری بر روی موجبرهای مجتمع در مدارچاپی پرداخته شد. به دلیل اینکه کوپلرهای موجبری دارای ضریب کیفیت بالا و ظرفیت توان بالا هستند اما مجتمع سازی آن‌ها به دلیل ساختار سه بعدیشان مشکل است، تدابیری برای بهبود این ادوات بر اساس ساختار SIW به کار برده شده است. به عبارتی مفهوم SIW این امکان را محقق می‌سازد که موجبر در روی زیرلایه مجتمع مدارات موج میلیمتری و میکروویوی ساخته شود. یک SIW در یک زیرلایه مسطح با آرایه‌هایی از سوراخ‌های فلزی بر روی یک برد مدار چاپی کم هزینه ساخته می‌شود و تقریباً خواص یکسانی با موجبر معمولی پر شده با دی‌الکتریک با همان لایه و یک پهنای معادل دارد. هدف از ساختار SIW برای طراحی کوپلر مایکروویوی، محدودیت فضایی در گیرنده‌های مخابراتی و موج میلیمتری است. همچنین این ساختار امکان مجتمع سازی بین مدارات موجبری و مدارات مسطح مانند مایکرواستریپ را ایجاد می‌کند. در این مقاله کوپلر موجبری SIW بر اساس تئوری کوپلینگ و روش چپی شف طراحی شد. در واقع به علت نیاز به پهنای باند بیشتر، روش چپی شف برای طراحی در نظر گرفتیم. پارامترهای پراکندگی برای دو کوپلر 20 dB با فرکانس مرکزی 10GHz برای حالت‌های ۰.۴، ۵ روزنه‌ای نشان می‌دهند که مقدار کوپلینگ در تمام پهنای باند تقریباً ثابت می‌ماند و یک تابع حساس به فرکانس نمی‌باشد. اگرچه ایزولاسیون تابعی حساس به فرکانس است. این مدل کوپلر دارای اندازه کوچک، کوپلینگ صاف و مقدار ایزولاسیون بالا می‌باشد. همچنین مشاهده شد که پهنای باند نسبی به دست آمده برای ساختار کوپلر پیشنهادی 60 درصد است.



شکل (۱۶): تصویر کوپلر ساخته شده روی زیرلایه RT/duroid 6010 به همراه کانکتورهای SMA در دو سمت آن

Fig. (16): Physical picture of SIW coupler, on substrate RT/duroid 6010 with SMA connector on both sides of coupler



شکل (۱۷): اندازه پارامترهای پراکندگی S (بر حسب دسی بل) حاصل از شبیه سازی و حاصل از اندازه گیری کوپلر ساخته شده

Fig. (17): Results obtained from simulated and measured directional coupler

پی نوشت:

- 1- Coplanar waveguide
- 2- Substrate Integrated Waveguide
- 3- Directional coupler
- 4- Branch -line
- 5- Return loss
- 6- Weak coupling
- 7- Bend
- 8- Finite Difference Frequency Domain
- 9- Insertion loss
- 10- Tapered microstrip line
- 11- Array factor
- 12- Scattering parameter
- 13- Network Analyzer

۴- مقایسه و بحث

همان‌طور که در بخش مقدمه ذکر شد طراحی کوپلر SIW در باندهای متفاوتی انجام شده است و هر کدام سعی در افزایش پهنای باند و ایزولاسیون بالاتر داشتند. در روش ذکر شده در این مقاله، با اعمال بر روی طراحی ساختار کوپلر SIW، باعث شد که پهنای باند افزایش چشمگیری داشته باشد و مقدار ایزولاسیون در کل پهنای باند مطلوب، دارای تغییرات یکسان و یا به عبارتی دارای ریب‌های یکسان باشد. همچنین تغییرات کوپلینگ نسبت به فرکانس کمتر و همواره در تمام پهنای باند ثابت می‌ماند. به این ترتیب عملکرد کوپلر پیشنهادی، مطلوب می‌باشد.

References

- [1] K. Wu, "Integration and interconnect techniques of planar and non-planar structures for microwave and millimeterwave circuits – current status and future trend," Proc. of Asia Pacific Microwave Conf., Taipei, pp.411-416, 2001.
- [2] D. Deslandes, K. Wu, "Integrated microstrip and rectangular waveguide in planar form", IEEE Microwave and Wire. Comp. Lett., Vol.11, pp.68-70, Feb. 2001.
- [3] D. Deslandes, K. Wu, "Single-substrate integration techniques for planar circuits and waveguide filters", IEEE Trans. on Micr. Theo. and Tech., pp.593-596, Feb. 2003.
- [4] S. Germain, D. Deslandes, K. Wu, "Development of substrate integrated waveguide power dividers", CCECE 2003 proceedings, pp.1921-1924, May 2003.
- [5] Li Yan, Wei Hong, Guang Hua, Jixin Chen, Ke Wu, Tie Jun Cui, "Simulation and experiment on SIW slot array antennas", IEEE Micr. and Wire. Comp. Lett., Vol.14, No.9, pp.446-448, Sep. 2004.
- [6] Y. Cassivi, D. Deslandes, K. Wu, "Substrate integrated waveguide directional couplers", In Proc. ASIA-Pacific Conf., Kyoto, Japan, Nov. 2002.
- [7] Z.C. Hao, W. Hong, J.X. Chen, H.X. Zhou, K.Wu, "Single-layer substrate integrated waveguide directional couplers", Proc. Inst. Elect. Eng., Vol.153, No.5, pp.426-431, Oct. 2006.
- [8] T. Djerafi, K. Wu, "Super-compact substrate integrated waveguide cruciform directional coupler", IEEE Microwave Wireless Compon. Lett., Vol.17, No.11, pp.757-759, Nov. 2007.
- [9] P. Chen, G. Hua, D.T. Chen, Y.C. Wei, W. Hong, "A double layer crossed over substrate integrated waveguide wide band directional coupler", Asia-Pacific Microwave Conf., 2008.
- [10] V.A. Labay, J. Bornemann, "Design of dual-band substrate integrated waveguide E-plane directional couplers", APMC 2009, Proc. of Asia Pacific Microwave Conf. 2009.
- [11] K. Tan, L. Xiu-zhen, "Compact directional coupler based on substrate integrated waveguide", Antenna Technology, 2009.
- [12] V.A Labay, J. Bornemann, "Simplified design of multilayered substrate-integrated waveguide RIBLET-SAAD couplers", Micr. and Opti. Tech. Lett., Vol.52, No.5, May 2010.
- [13] F. Carrera, D. Navarro, M. Baquero-Escudero, V.M. Rodrigo-Peñarrocha, "Compact substrate integrated waveguide directional couplers in Ku and K bands", Proc. of European Micr. Conf., 2010.
- [14] R. Collin, "Foundations for microwave engineering", McGraw-Hill, New York, 1966.
- [15] J.E. Rayas-Sanchez, V. Gutierrez-Ayala, "A general EM-based design procedure for single-layer substrate integrated waveguide interconnects with microstrip transitions", Trans. Micro. Theo. Tech., pp.983-986, 2008.
- [16] F. Xu, K. Wu, "Guided-wave and leakage characteristics of substrate integrated waveguide", IEEE Trans. Micro. Theo. Tech., Vol.53, pp.66-73, Jan. 2005.
- [17] J. Uher, J. Bornemann, U. Rosenberg, "Waveguide components for antenna feed systems: Theory and CAD", Boston, Artech House, 1993.
- [18] D. Deslandes, K. Wu, "Integrated microstrip and rectangular waveguide in planar form", IEEE Microwave and Wire. Compon. Lett., Vol.11, pp.68-70, Feb. 2001.