

طراحی و ساخت مجیک تی یک لایه با استفاده از موجبر نصف مد مجمع شده در زیرلایه برای کاربردهای باند Ku

محمد سجاد بیاتی^۱، استادیار؛ تحسین خورند^۲، دانشجو

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه رازی - کرمانشاه - ایران - s.bayati@razi.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه رازی - کرمانشاه - ایران - cr.tahsin@yahoo.com

چکیده: در این مقاله، یک مقسم توان چهار دهانه‌ای T شکل (مجیک تی) با استفاده از ساختار موجبر مجمع شده در زیرلایه نصف مد (HMSIW) برای باند فرکانسی ku با ترکیب یک پیوند تی صفحه H و یک پیوند تی معکوس کننده فاز خط شکافدار به HMSIW بر روی یک زیرلایه تک لایه طراحی و پیشنهاد شده است. با استفاده از خط شکافدار در پیوند تی خط شکافدار به HMSIW ۱۸۰ درجه اختلاف فاز در بازوهای تقسیم توان تولید شده است. برای بهینه سازی تلفات برگشتی و تقسیم توان به طور مساوی بین پورت های خروجی از یک سوراخ متالیزه در پیوند تی صفحه H استفاده شده است. با استفاده از نرم افزار HFSS این مجیک تی شبیه سازی و طراحی و سپس با استفاده از تکنولوژی برد مدار چاپی یک نمونه در باند Ku بر روی یک زیرلایه تک لایه طراحی و ساخته شد. تلفات برگشتی نتایج اندازه گیری در بازه ۱۲/۸ GHz تا ۱۵/۲ GHz با پهنای باند نسبی ۱۷٪ بهتر از ۱۰ dB و عدم تعادل در دامنه و اختلاف فاز در خروجی به ترتیب ۰/۳۴ dB و ۳ درجه می باشد.

واژه های کلیدی: موجبر مجمع در زیرلایه نصف مد (HMSIW)، خط شکافدار، مجیک تی.

Single-Layered Magic-T using Half Mode Substrate Integrated Waveguide for Ku band

M. S. Bayati¹, Assistant Professor; T. Khorand², Student

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran, Email: s.bayati@razi.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran, Email: cr.tahsin@yahoo.com

Abstract: In this paper, a new single layer half mode substrate integrated waveguide (HMSIW) magic-T utilizing H-plane HMSIW power divider and E-plane slotline-to-HMSIW transition has been designed and proposed. By using slotline in the E-plane T-junction, a 180° out-of-phase between two output ports has been generated. In order to optimize return loss and split the input signal equally into two in-phase signals at the output ports, a metallic via hole in the H-plane T-junction has been used. The magic-T is simulated and optimized by Ansoft HFSS software and a Ku-band prototype is designed and fabricated using the standard printed circuit board process. Experimental results demonstrate that the return losses are less than 10 dB, and the fabricated HMSIW magic-T has a 17% bandwidth over frequency range of 12.8-15.2 GHz with 0.34 amplitude imbalances and 3° phase differences in the output ports.

Keywords: Half mode substrate integrated waveguide, magic-T and slotline.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۱/۲۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۱۵

نام نویسنده مسئول: محمد سجاد بیاتی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تبریز - بلوار ۲۹ بهمن - دانشگاه تبریز - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

در این مقاله یک مجیک تی براساس ساختار HMSIW با ترکیب یک پیوند تی HMSIW در صفحه‌ی E و H در باند ku بر روی زیرلایه RO4003 با ضریب دی‌الکتریک 3.38 و ضخامت 0.8 mm طراحی و ساخته شده‌است. این مجیک تی دارای ابعادی کوچک و ساختاری ساده می‌باشد و برای بهینه‌سازی تقسیم توان بین دهانه‌های خروجی و تلفات برگشتی فقط به یک سوراخ متالیزه نیاز دارد.

۲- طراحی مجیک تی HMSIW

برای طراحی مجیک تی در ابتدا پیوند تی خط شکافدار به HMSIW، که 180 درجه اختلاف فاز در بازوهای تقسیم توان تولید می‌کند، مورد بررسی قرار گرفته‌است. سپس یک پیوند تی HMSIW صفحه H طراحی شده و در نهایت با ترکیب این دو پیوند یک مجیک تی HMSIW طراحی و ساخته شده‌است که دارای ساختار ساده و ابعاد کوچک می‌باشد.

۱-۲- پیوند تی HMSIW در صفحه E

شکل ۱ پیکربندی ساختار انتقال از خط شکافدار به HMSIW را نشان می‌دهد. این ساختار از یک انتقال میکرواستریپ به خط شکافدار و سپس انتقال از خط شکافدار به HMSIW تشکیل می‌شود. خط شکافدار در صفحه‌ی پایین قرار گرفته و به اندازه L وارد موجر HMSIW شده‌است. هنگامی که سیگنال ورودی از خط شکافدار وارد HMSIW می‌شود، میدان الکتریکی پلاریزه شده افقی در داخل خط شکافدار تبدیل به میدان الکتریکی با پلاریزاسیون عمودی در داخل HMSIW می‌شود و با توجه به چرخش میدان الکتریکی در صفحه‌ی A-B دهانه‌های خروجی توان‌های برابر با اختلاف فاز 180 درجه دریافت می‌کنند.

به منظور افزایش پهنای باند انتقال از خط میکرواستریپ به خط شکافدار از استاب‌های شعاعی استفاده شده‌است. در [۱۵] نشان داده شده‌است که برای کاربردهای پهن‌بند شعاع استاب‌های استفاده شده تقریباً برابر با یک چهارم طول موج در فرکانس مرکزی است. بنابراین با استفاده از رابطه زیر شعاع تقریبی استاب‌ها قابل محاسبه می‌باشد،

$$\frac{\lambda}{4} \approx \frac{3}{4} r \rightarrow r \approx \frac{\lambda}{6} \quad (1)$$

خطوط میکرواستریپ و شکافدار به اندازه یک چهارم طول موج در محل هم‌پوشانی نسبت به یکدیگر امتداد می‌یابند، بنابراین خط میکرواستریپ مدار باز و خط شکافدار اتصال کوتاه در صفحه عبور، به ترتیب اتصال کوتاه و مدار باز دیده می‌شوند. برای بهینه‌سازی پاسخ فرکانسی پیوند تی معرفی شده تمامی پارامترها با استفاده از نرم‌افزار HFSS بهینه شده و در شکل ۲ نشان داده شده‌اند.

ساختار SIW شباهت زیادی با موج‌برهای مستطیلی فلزی دارد. دیوارهای کناری موجر مستطیلی در داخل زیرلایه با استفاده از سوراخ‌های متالیزه ساخته می‌شود و دیوارهای بالا و پایین آن با استفاده از صفحه‌های فلزی مدار چاپی شکل می‌گیرد.

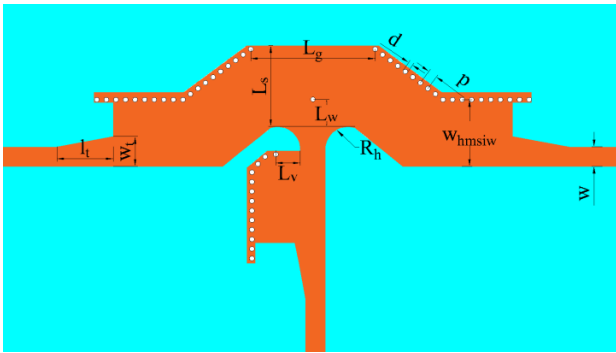
در سال‌های اخیر با توجه به مزیت‌های این ساختار مانند کم هزینه بودن ساخت، تلفات کم، ضریب کیفیت بالا و قابلیت یکپارچه‌سازی با اجزای مایکروویوی توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۴-۱]. علاوه بر این ساختار SIW امکان ساخت یک مدار کامل شامل انتقال‌ها، موج‌برها و آنتن‌ها در شکل مسطح بر روی مدار چاپی فراهم می‌سازد. با استفاده از ساختار SIW به عنوان یک خط انتقال جدید، وسایل مایکروویوی زیادی طراحی شده‌است. اجزایی مانند فیلترها، مقسم توان‌ها، مجیک تی‌ها و رزوناتورهای محفظه‌ای که با استفاده از خطوط مایکرواستریپ، موج‌برهای هم‌صفحه و موج‌برهای فلزی ساخته شده‌بودند، با استفاده از SIW دوباره طراحی شدند. اما یکی از اشکال‌های عناصر ساخته شده ابعاد نسبتاً بزرگ آن‌ها می‌باشد. برای کوچک‌سازی ساختار SIW از موجر مجتمع در زیرلایه نصف مد (HMSIW) استفاده می‌شود که ابعاد آن تقریباً به نصف کاهش می‌یابد. ایده‌ی اصلی ساخت HMSIW این است که در صفحه‌ی تقارن SIW در جهت انتشار، میدان الکتریکی مماسی بیشینه و میدان مغناطیسی عمودی کمینه است. لذا می‌توان این صفحه را یک دیواره‌ی مغناطیسی مجازی فرض کرد. با برش ساختار SIW در این صفحه، نصف توزیع میدان بدون تغییر حفظ می‌شود و بدون ایجاد تأثیر منفی در عملکرد SIW تلفات و ابعاد آن تقریباً نصف می‌شود [۵-۷].

مجیک تی یک شبکه چهاردهانه‌ای است که از ترکیب پیوندهای تی در صفحه‌های E و H ساخته می‌شود، که از دهانه‌های جمع و تفاضل آن به ترتیب توان‌های برابر هم‌فاز و غیرهم‌فاز از ورودی به دهانه‌های خروجی انتقال داده می‌شود. انواع مجیک تی با توجه به ویژگی‌هایی که دارند یکی از اجزای اصلی در مدارهای مایکروویوی می‌باشد، که به طور گسترده مانند ترکیب کننده توان، مقسم توان، تقویت کننده‌ها و شبکه تغذیه آنتن‌های آرایه‌ای استفاده می‌شوند [۸].

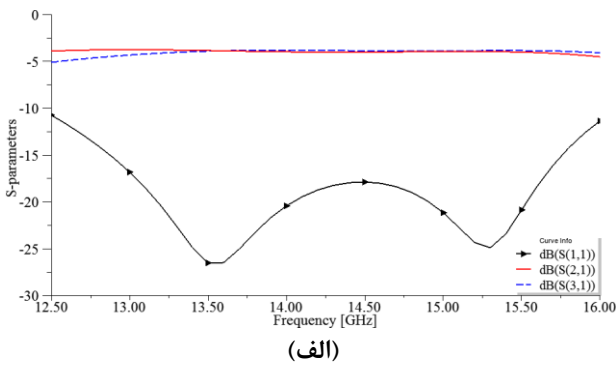
با توجه به کاربردهای اشاره شده، در دهه‌ی گذشته توجه بیشتری به مجتمع‌سازی مجیک تی‌های متداول با استفاده از تکنولوژی SIW انجام گرفت و چند مجیک تی با استفاده از تکنولوژی SIW بر روی زیرلایه‌های تک لایه و چندلایه طراحی و ساخته شدند [۹-۱۴]. با این وجود این ساختارها پیچیده و دارای ابعاد بزرگی هستند و یکی از مشکلات اصلی آن‌ها استفاده از چندین سوراخ متالیزه برای تقسیم توان بین دهانه‌های خروجی و بهینه‌سازی تلفات عبوری می‌باشد. هم‌چنین در برخی از مجیک تی‌های معرفی شده از زیرلایه‌های چندلایه در طراحی مجیک تی استفاده شده‌است که به راحتی قابل پیاده‌سازی و ساخت نمی‌باشد.

یک خط تیر به موجر HMSIW تطبیق شده است. از آنجا که یک طرف ساختار HMSIW اتصال باز است و ساختار نامتقارنی دارد لذا هرگونه اتصال شاخه فرعی به لبه باز HMSIW باعث خراب شدن توزیع میدان الکتریکی داخل HMSIW می شود و برای ایجاد ارتباط شاخه فرعی با لبه باز HMSIW نیاز به دقت بالایی در طراحی می باشد.

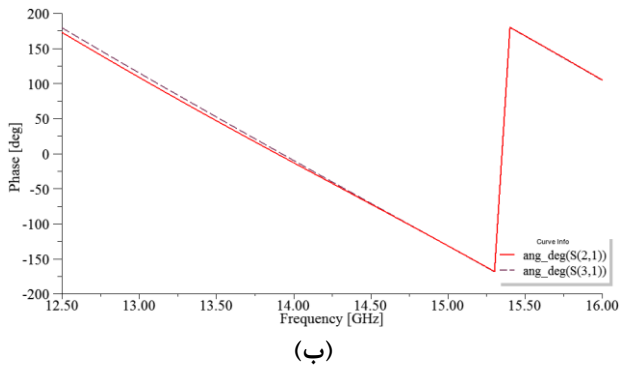
برای تقسیم توان به طور مساوی بین دهانه های خروجی و هم چنین تطبیق دهانه ورودی با دهانه های خروجی از یک سوراخ متالیزه در محل اتصال شاخه فرعی استفاده شده است. فاصله سوراخ متالیزه با لبه HMSIW برای بهینه کردن میزان تلفات برگشتی و تقسیم توان به طور مساوی بین پورت های خروجی باید با دقت بهینه سازی شود.



شکل ۳: پیوند تی HMSIW در صفحه H



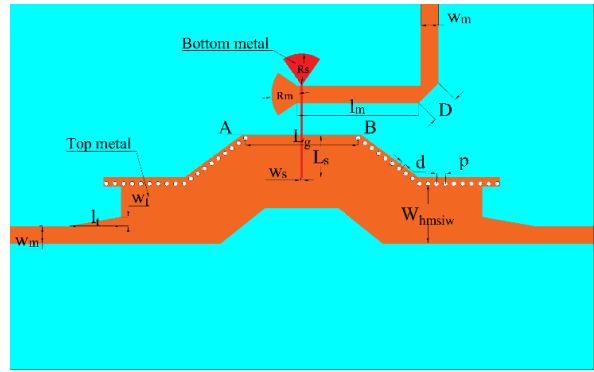
(الف)



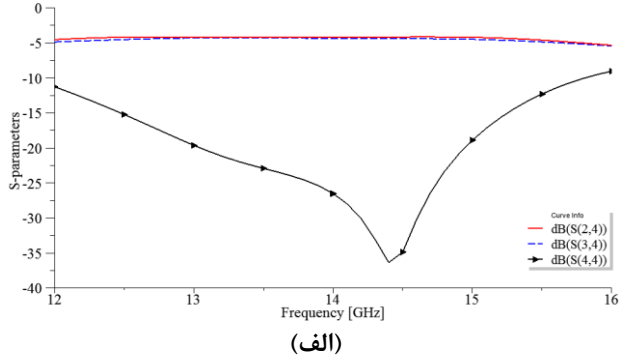
(ب)

شکل ۴: پاسخ فرکانسی پارامترهای پراکندگی پیوند تی در صفحه H (الف دامنه ب) فاز

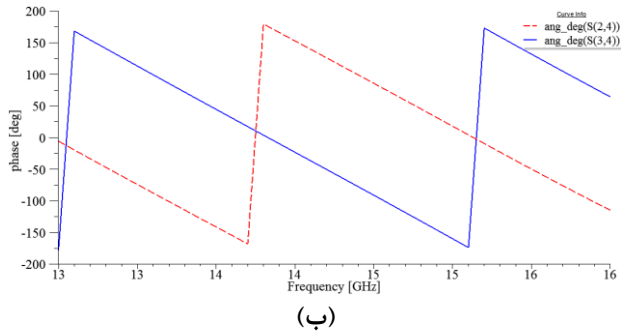
$W_m = 1/6$ mm, $d = 0/4$ mm, $p = 0/8$ mm, $L_s = 2/0.5$ mm, $L_w = 7$ mm, $L_g = 1/0/4$ mm, $L_h = 6/8$ mm, $W_{hmsiw} = 5/57$ mm, $L_t = 4/7$ mm, $w_t = 0/85$ mm, $R_h = 1/9$ mm.



شکل ۱: پیکربندی ساختار انتقال از خط شکاف دار به HMSIW



(الف)



(ب)

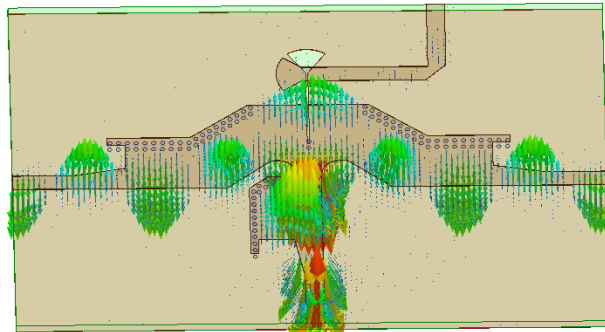
شکل ۲: پاسخ فرکانسی پارامترهای پراکندگی پیوند تی در صفحه E (الف دامنه ب) فاز

$W_m = 1/6$ mm, $l_m = 1/28$ mm, $d = 0/4$ mm, $p = 0/8$ mm, $R_s = 2/825$ mm, $R_m = 2/06$ mm, $D = 2/613$ mm, $L_c = 4$ mm, $w_s = 0/2$ mm, $W_{hmsiw} = 5/57$ mm, $L_t = 4/7$ mm, $w_t = 0/85$ mm, $L_g = 1/0/4$ mm, $\theta = 70^\circ$.

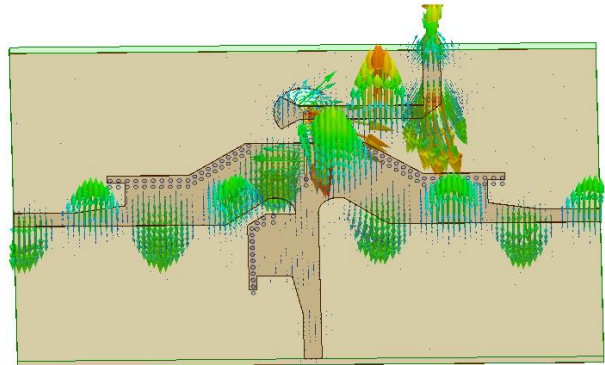
شکل ۲ پاسخ فرکانسی نتایج شبیه سازی شده پیوند تی ۱۸۰ درجه معکوس کننده فاز خط شکاف دار به HMSIW را با استفاده از نرم افزار HFSS نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود پیوند تی ذکر شده دارای پهنای باند زیادی می باشد و عدم تعادل بین توان های خروجی و فاز آن ها به ترتیب کمتر از ۰/۲ dB و ۳ درجه می باشد.

۲-۲- پیوند تی HMSIW در صفحه H

در این بخش یک مقسم توان سه دهانه ای HMSIW در صفحه H طراحی شده است. شکل ۳ پیوند تی پیشنهاد شده را نشان می دهد که در آن دهانه ۱ دهانه ورودی و دهانه های ۲ و ۳ دهانه های خروجی هستند و شاخه عمودی HMSIW به لبه باز HMSIW افقی وصل شده است. در هر کدام از دهانه ها خط مایکرواستریپ ورودی با استفاده از



(الف)



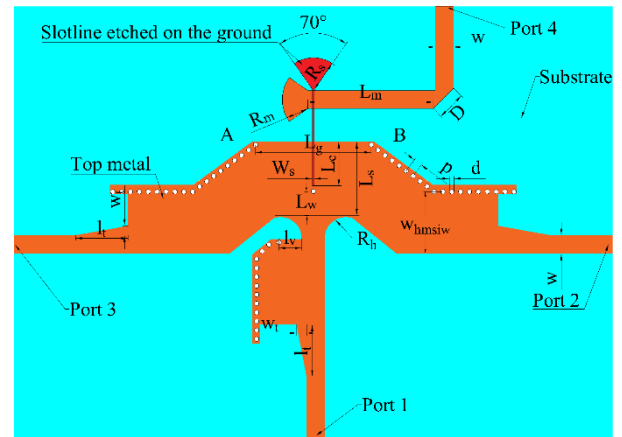
(الف)

شکل ۶: توزیع بردار میدان الکتریکی (الف) هم فاز ب) غیرهم فاز

مجیکتی پیشنهادی بر روی زیرلایه تک لایه RO4003 با ضریب دی الکتریک ۳/۳۸ و ضخامت ۰/۸ mm طراحی و پیاده سازی شد. شکل ۷ عکس مجیکتی ساخته شده را نشان می دهد. پس از بهینه سازی پارامترهای نشان داده شده در شکل ۵ با استفاده از نرم افزار HFSS، مقادیر آن ها در زیر شکل ذکر شده است.

در شکل ۸ نتایج شبیه سازی و اندازه گیری برای تلفات برگشتی و عبوری نشان داده شده است. با توجه به شکل تلفات برگشتی نتایج اندازه گیری در بازه ۱۲/۸ GHz تا ۱۵/۲ GHz با پهنای باند نسبی ۱۷٪ در فرکانس مرکزی ۱۴ GHz بهتر از ۱۰ dB است و تلفات عبوری نزدیک ۴ dB می باشد. تفاوت بین نتایج اندازه گیری و شبیه سازی را می توان به عدم دقت کافی در فرایند ساخت، تلفات کانکتورهای SMA و تفاوت بین ضریب دی الکتریک نسبی نامی و عملی نسبت داد.

شکل ۹ نمودارهای ایزولاسیون بین دهانه های ۱ و ۴ و هم چنین دهانه های ۲ و ۳ را نشان می دهد. ایزولاسیون بین دهانه ۱ و ۴ بهتر از ۱۷ dB و بین دهانه های ۲ و ۳ بهتر از ۱۳ dB می باشد. شکل ۱۰ عدم تعادل فاز اندازه گیری شده را در حالت هم فاز و غیرهم فاز نشان می دهد. بیشترین عدم تعادل فاز در حالت هم فاز و غیرهم فاز به ترتیب کمتر از ۱ و ۳ درجه می باشد. در جدول ۱ مشخصات ساختار مجیکتی معرفی شده در این مقاله با ساختارهای مشابه مقایسه شده است. در مقایسه با مجیکتی های [۹-۱۲] این مجیکتی علاوه بر این که پهنای باند قابل قبولی دارد دارای ابعادی کوچک تر و ساختاری ساده تر می باشد.



شکل ۵: پیکربندی مجیکتی پیشنهاد شده براساس ساختار

HMSIW

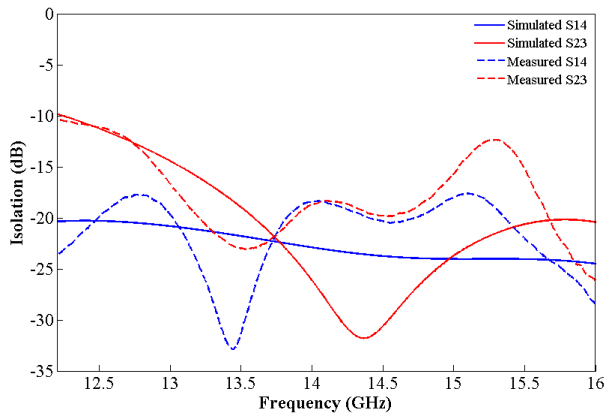
$W = 1/6 \text{ mm}$, $L_m = 11/28 \text{ mm}$, $d = 0/4 \text{ mm}$, $p = 0/8 \text{ mm}$, $R_s = 2/825 \text{ mm}$, $R_m = 2/06 \text{ mm}$, $R_b = 1/9 \text{ mm}$, $D = 2/613 \text{ mm}$, $L_w = 7 \text{ mm}$, $L_c = 6/8 \text{ mm}$, $L_g = 10/4 \text{ mm}$, $L_r = 4 \text{ mm}$, $L_v = 2/05 \text{ mm}$, $W_s = 0/2 \text{ mm}$, $W_{msiw} = 5/57 \text{ mm}$, $L_t = 4/7 \text{ mm}$, $w_1 = 0/85 \text{ mm}$, $\theta = 70^\circ$.

شکل ۴ پاسخ فرکانسی نتایج شبیه سازی شده پیوند تی HMSIW را با استفاده از نرم افزار HFSS نشان می دهد. از لحاظ تئوری هر کدام از دهانه های خروجی باید ۳ dB از توان ورودی را دریافت کنند اما به علت تلفات ناشی از دی الکتریک و مس استفاده شده، تلفات عبوری S_{21} و S_{31} با توجه به نتایج شبیه سازی نشان داده شده در شکل ۴ کمتر از dB ۴ و عدم تعادل بین اندازه ی آن ها تقریباً ۰/۲ dB می باشد. هم چنین سیگنال های خروجی از دهانه های ۲ و ۳ هم فاز بوده و عدم تعادل فاز بین آن ها کمتر از ۴ درجه می باشد.

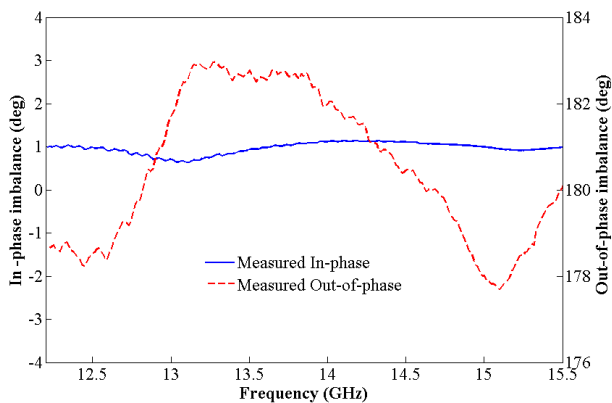
۳- طراحی و ساخت مجیکتی HMSIW

شکل ۵ پیکربندی مجیکتی HMSIW پیشنهاد شده را نشان می دهد که از ترکیب یک پیوند تی معکوس کننده فاز خط شکاف دار به HMSIW و یک پیوند تی صفحه H که در بخش های قابل طراحی شده اند تشکیل شده است. دهانه های ۱ و ۴ به ترتیب دهانه های جمع و تفاضل بوده و دهانه های ۲ و ۳ بازوهای تقسیم توان هستند. بدون در نظر گیری ابعاد انتقال از خط میکرواستریپ به خط شکاف دار و خط تیپر استفاده شده برای انتقال از خط میکرواستریپ به HMSIW ابعاد مجیکتی $32 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$ می باشد. از نظر سادگی و ابعاد کوچک تر از [۹، ۱۰] می باشد.

شکل ۶ بردار میدان الکتریکی را در مجیکتی تک لایه طراحی شده براساس ساختار HMSIW نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود عملکرد این مجیکتی به این شرح است که سیگنال وارد شده به دهانه ۱ توسط سوراخ متالیزه به دو قسمت هم فاز تقسیم شده و وارد دهانه های ۲ و ۳ می شود. این سیگنال ها در داخل خط شکاف دار همدیگر را خنثی کرده و دهانه ۴ ایزوله می ماند. با تحریک دهانه ۴ به عنوان ورودی سیگنال ورودی به دو قسمت غیر هم فاز تقسیم شده و وارد دهانه های ۲ و ۳ می شود و در این حالت دهانه ۱ ایزوله می ماند.



شکل ۹: نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری ایزولاسیون



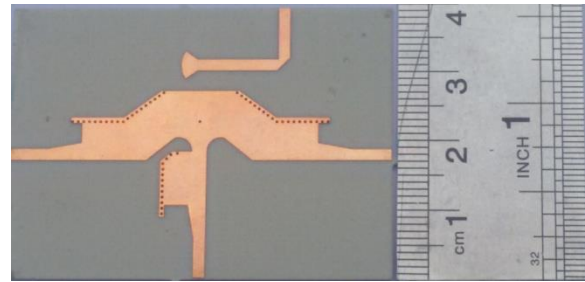
شکل ۱۰: عدم تعادل فاز اندازه‌گیری شده در دو حالت هم‌فاز و غیرهم‌فاز

۴- نتیجه

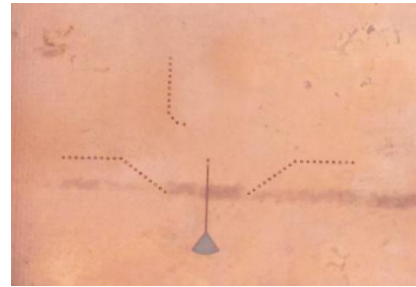
یک مجیک‌تی براساس ساختار HMSIW در باند ku با ترکیب پیوند تی معکوس‌کننده فاز خط شکاف‌دار به HMSIW و یک پیوند تی صفحه H بر روی یک زیرلایه تک‌لایه طراحی و ساخته شد. نتایج شبیه‌سازی شده طرح پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار HFSS با نتایج اندازه‌گیری مقایسه شدند و تقریباً موافقت خوبی بین آن‌ها دیده شد. این نتایج نشان داد که تلفات برگشتی خوب، ایزولاسیون بالا و تعادل فاز و دامنه قابل قبولی به دست آمده است.

مراجع

- [1] Hirokawa J, Ando M., "Single-layer feed waveguide consisting of posts for plane TEM wave excitation in parallel plates," *IEEE Trans Antennas Propag* vol. 46, no. 5, pp. 625–630, 1998.
- [2] Deslandes D, Wu K., "Integrated microstrip and rectangular waveguide in planar form," *IEEE Microw Wirel Components Lett*. Vol. 11, no. 2, pp. 68–70, 2001.

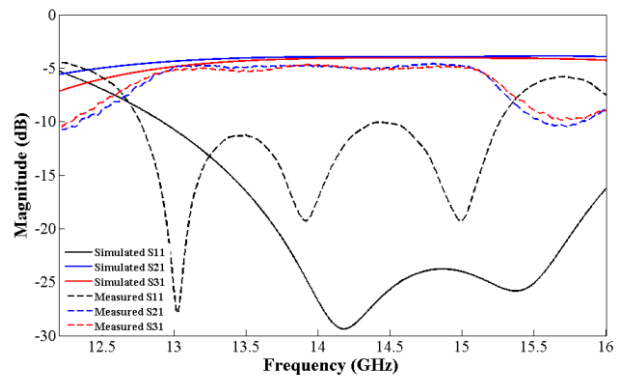


(الف)

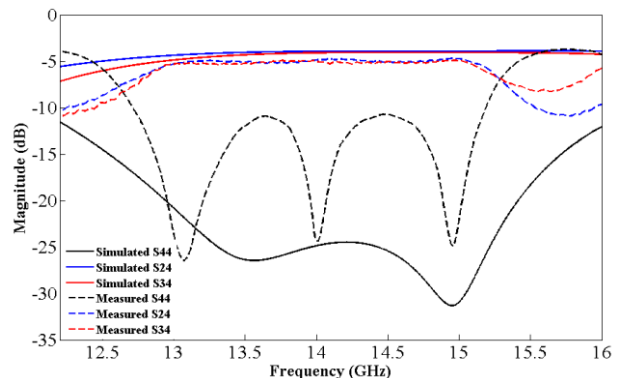


(ب)

شکل ۷: مجیک‌تی ساخته شده (الف) نمای بالا (ب) نمای زیرین



(الف)



(ب)

شکل ۸: نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری پارامترهای پراکندگی

جدول ۱: مقایسه مشخصات میکیتی پیشنهادی با چند میکیتی ساخته شده براساس ساختار SIW

Reference	Magic-T Type	Fractional Bandwidth	S ₄₁ (dB)	S ₂₃ (dB)	Insertion Loss (dB)	Phase Imbalance (deg)	Amplitude Imbalance (dB)	Size (mm ²)
[۹]	SIW	۲۳/۲% (۸/۴-۱۰/۶ GHz)	<-۳۰	<-۲۰	۳/۷	۲	۰/۵	۳۸×۳۸
[۱۰]	SIW	۱۱/۲% (۸/۴-۹/۴ GHz)	<-۳۰	<-۱۵	۳/۷	۱/۵	۰/۲	۴۲×۲۶
[۱۱]	SIW	۱۷/۹% (۱۳/۲-۱۵/۸ GHz)	<-۲۸	<-۱۲/۵	۳/۴	۱/۵	۰/۲۴	۵۹×۳۸
[۱۲]	HMSIW	۱۸/۳% (۱۲/۹-۱۵/۵ GHz)	<-۳۱	<-۱۶	۳/۸۵	۲	۰/۲۳	۳۱×۲۶
This work	HMSIW	۱۷% (۱۲/۸-۱۵/۲ GHz)	<-۱۷	<-۱۳	۴	۳	۰/۳۴	۱۶×۳۲

- Concept and Its Mixer Applications,” *IEEE Trans Microw Theory Tech*, vol. 59, no. 1, pp. 72–79, 2011.
- [10] Fan Fan He, Ke Wu, Wei Hong, Hong Jun Tang, Hong Bing Zhu, Ji Xin Chen., “A Planar Magic-T Using Substrate Integrated Circuits Concept,” *IEEE Microw Wirel Components Lett*, vol. 18, no. 6, pp. 386–388, 2008.
- [11] Feng W, Che W, Deng K., “Compact planar magic-T using E-plane substrate integrated waveguide (SIW) power divider and slotline transition,” *IEEE Microw Wirel Components Lett*, vol. 20, no. 6, pp. 331–333, 2010.
- [12] Feng W, Che W, Eibert TF., “Compact planar magic-T using half mode substrate integrated waveguide and slotline coupling,” *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp.*, p. 1–4, 2011.
- [13] P. Li, H. Chu and S. Chen, “SIW magic-T with bandpass response,” *Electronics Letters*, Vo. 51, No. 14, pp. 1078–1080, 2015.
- [14] Mahdad Mansouree and Alireza Yahaghi, “Planar Magic-Tee Using Substrate Integrated Waveguide Based on Mode-Conversion Technique,” *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 26, no. 5, pp. 307–309, 2016
- [15] Zinieris MM, Sloan R, Davis LE., “A broadband microstrip-to-slot-line transition,” *Microw Opt Technol Lett*, vol. 18, pp.339–342, 1998.
- [3] Deslandes D., “Design equations for tapered microstrip-to-Substrate Integrated Waveguide transitions,” *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp*, p. 704–707, 2010.
- [4] Feng Xu, Ke Wu., “Guided-wave and leakage characteristics of substrate integrated waveguide,” *IEEE Trans Microw Theory Tech*, vol. 53, no. 1, pp. 66–73, 2005.
- [5] Hong W, Liu B, Wang Y, Lai Q, Tang H, Yin XX, et al., “Half Mode Substrate Integrated Waveguide: A New Guided Wave Structure for Microwave and Millimeter Wave Application,” *31st Int. Conf. Infrared Millim. Waves and 14th Int. Conf. Terahertz Electron.*, IEEE, pp. 219–219, 2006.
- [6] Liu B, Hong W, Wa Y-Q, Lai Q-H, Wu K., “Half Mode Substrate Integrated Waveguide (HMSIW) 3-dB Coupler,” *IEEE Microw Wirel Components Lett*, vol. 17, no. 1, pp.22–24, 2007.
- [7] Liu B, Wei Hong W, Lin Tian L, Hong-Bing Zhu H-B, Wei Jiang W, Ke Wu K., “Half mode substrate integrated waveguide (HMSIW) multi-way power divider,” *Asia-Pacific Microw. Conf.*, IEEE, pp. 917–920, 2006.
- [8] Tokumitsu T, Hara S, Aikawa M., “Very small, ultra-wideband MMIC magic-T and applications to combiners and dividers,” *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Digest*, vol. 3, pp. 963–966, 1989.
- [9] He FF, Wu K, Hong W, Han L, Chen X., “A Planar Magic-T Structure Using Substrate Integrated Circuits

زیر نویس ها

¹ Half Mode Substrate Integrated Waveguide