پنجمین کنفرانس مهندسی مخابرات ایران (ICCE-2021)

آشکارساز در باند زیرمیلی‌متری مبتنی بر پیوند جوزفسون ابررسانای دما بالا

محبوبه باغی هدشی[1]
[1]دانشجوی کارشناسی ارشد مخابرات میدان و موج، دانشگاه شاهد
تهران، ایران
mbaghihedeshi@gmail.com
شماره تلفن: ۰۹۱۲۸۱۹۹۴۰۵

سید محمد حسن جوادزاده[2]
[2]استادیار گروه مخابرات دانشکده فنی و مهندسی،دانشگاه شاهد
تهران، ایران
smh.javadzadeh@shahed.ac.ir
شماره تلفن: ۰۲۱۵۱۲۱۲۰۸۲

چکیده—در پیوند جوزفسون بین دو ابررسانا یک لایه‌ی متفاوت مانند عایق یا رسانای معمولی قرار می‌گیرد، با عبور جریان ثابت از این پیوند بین دو تابع ابررسانا دارای اختلاف فاز و در نهایت سبب پدیده تونل‌زنی از یک ابررسانا به ابررسانای دیگر می‌شود. هدف ما در این مقاله طراحی آشکارساز مبتنی بر پیوند جوزفسون و بررسی پاسخ فرکانسی رزوناتور مایکرواستریپی هیبرید جوزفسونی و بیان ضریب‌کیفیت ساختار می‌باشد. ابتدا طراحی را با آشکارساز موج میلی‌متری شروع کرده و سپس با تغییر در ساختار آشکارساز جوزفسونی به بهبود این پارامترها پرداختیم. سپس آشکارساز در باند زیرمیلی‌متری را با کوپلر جهتی ریبلت طراحی شده در این باند بیان کرده و رزوناتورها را به صورت آرایه با استفاده از خطوط مایکرواستریپ هیبرید با استفاده از تغییر نوع ماده پیوند جوزفسونی که پیوند دارای ابررسانای دمای بحرانی بالا و تغییر ضخامت لایه‌ها طراحی کردیم و پارامترها را مقایسه و بهبود بخشیدیم.

کلیدواژه-ابررسانا،آشکارساز جوزفسونی،رزوناتور مایکروواستریپی هیبرید، باندزیرمیلی‌متری، کوپلر جهتی ریبلت.

۱. امواج میلی‌متری و زیرمیلی‌متری و اهمیت آن

باند زیر میلی‌متری هم شامل اغلب انرژی‌های منتشر شده از ابرهای مولکولی سردشده می‌باشد. طول موج کوتاه، پهنای باند زیاد و تاثیرات متقابل جوی، سه مشخصه مهم امواج میلی‌متری بوده که هر یک سبب مزایا و محدودیت‌هایی می‌شوند. از آن‌جایی که طول این امواج کوتاه‌تر است، اجزای عناصر موج زیر میلی‌متری کوچک‌تر بوده و می‌توان آن‌ها را به صورت فشرده در هواپیما، موشک و ماهواره استفاده نمود[۱].

۲. طراحی آشکار ساز مبتنی بر کوپلر و رزوناتور موجبری جوزفسونی

۲-۱. ساختار خط انتقال

ما از فناوری موجبر مستطیلی استفاده نموده‌ایم.

برای طراحی رزوناتور جوزفسونی از خط مایکرواستریپ استفاده شده‌است[۲].

۲-۲. جنس مواد

ما در طراحی رزوناتور آشکارساز در باند میلی‌متری با توجه به مقاله مرجع [۳] از هادی Si که ابررسانای نوع دوم و از نظریه BCS پیروی می‌کند و استفاده می‌کنیم.

از سویی دمای بحرانی در هادی‌های دمای بحرانی بالا در حدود ۷۷ کلوین است[۴]. ما در طراحی رزوناتور آشکارساز در باند زیرمیلی-متری از ایتریم باریم کوپر اکساید (YBCO) با دمای بحرانی ۹۲ کلوین با میکا استفاده می‌کنیم[۵].

۲-۲. محدوده باند فرکانسی

ساختار آشکارساز در باند میلی‌متری ۸۳ تا ۱۰۱ گیگاهرتز و در باند زیرمیلی‌متری ۴۹۰ تا ۵۱۰ گیگاهرتز طراحی می‌شود.

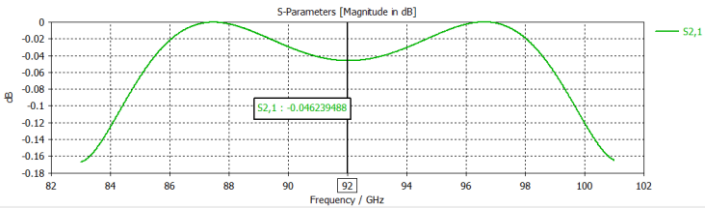
۳. طراحی و شبیه‌سازی آشکارساز در باند میلی‌متری

۳-۱. طراحی رزوناتور پیوند جوزفسونی در باند میلی‌متر

در جدول ۱ ابعاد این طراحی در cst و هم چنین در شکل ۱ پاسخ فرکانسی آورده شده‌است.

جدول ۱: مقادیر ابعاد رزوناتور

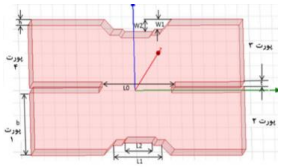
ابعاد	میلی‌متر
B	۵،۲۵
H	۵،۲۵
total width	۲،۵۲
total leight	۱۰
T	۰،۲
L0	۳،۴
W1	۰،۴
L1	۲،۲
W2	۰،۵
L2	۱،۲



شکل۱: نمودار S_{21} پاسخ فرکانسی رزوناتور در باند میلی متر

۳-۲. طراحی کوپلر تقسیم کننده توان مساوی در باند میلی‌متری

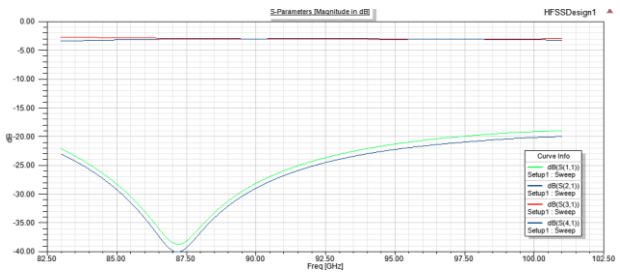
با توجه به شکل ۲ و مقاله مرجع [۶] بعد از انجام طراحی اولیه و بهینه‌سازی با نرم‌افزارمهندسی CST ابعاد جدول ۲ به عنوان ابعاد نهایی کوپلر به دست آمد. هم‌چنین با توجه به رزوناتور مربوط به قسمت ۳-۱ دهانه‌های کوپلر ۹۰ درجه طراحی شده‌است و نتایج شبیه‌سازی در شکل ۳ در hfss آورده شده‌است.



شکل ۲: شماتیک کوپلر ریبلت چند پله‌ای فرکانس میلی‌متری[۶]

جدول ۲: مقادیر ابعاد نهایی کوپلر ریبلت چند پله‌ای موج میلی‌متری

ابعاد	میلی‌متر
عرض رزوناتور	۲،۵
طول رزوناتور	۱۰
ضخامت لایه میکا	۰،۵
ضخامت لایه سیلیکون	۲
عرض فلز مس	۰،۵
ضخامت فلز مس	۰،۰۱۸



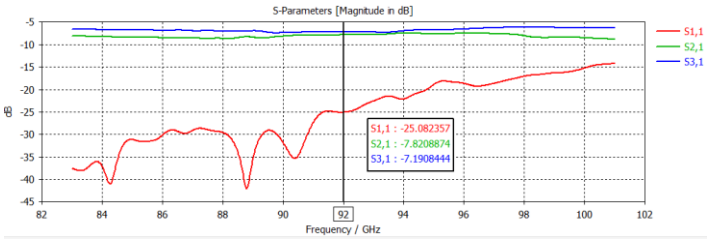
شکل۳: پاسخ های فرکانسی کوپلر ریبلت میلی‌متری شبیه‌سازی شده با hfss

۳-۳. طراحی آشکار ساز با دو رزوناتور در باند میلی‌متری

در این بخش آشکارساز موج میلی‌متری را با توجه به رزوناتور قسمت ۳-۱ و کوپلر طراحی شده قسمت ۳-۲ و مرجع [۴] شبیه-سازی می‌کنیم. بین کوپلر و رزوناتور فاصله گپ۰،۱ ، ۰،۵ و ۱ میلی-متر در نظر گرفته شده‌است.

الف) طراحی آشکارساز با در نظر گرفتن فاصله گپ ۰،۱ میلی‌متر بین کوپلر و رزوناتور

در cst شبیه سازی آشکارساز دو رزوناتوری با گپ ۰،۱ میلی‌متر انجام شده و نتایج حاصل از آن در شکل ۴ نمایش داده‌شده‌است.

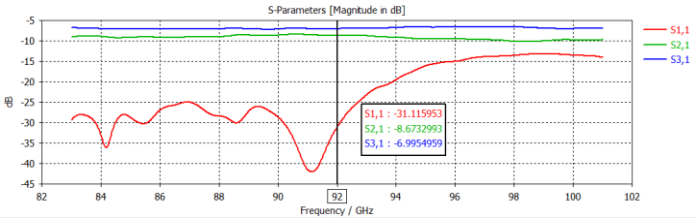


شکل۴: پاسخ‌های فرکانسی آشکارساز موج میلی‌متری دو رزوناتوری قسمت الف

با توجه به شبیه‌سازی تلفات پورت ورودی ۰،۲۱۵ و ضریب کیفیت خروجی ۱۸۳،۰۱۱ می‌باشد.

ب) طراحی آشکارساز با در نظر گرفتن فاصله گپ ۰،۵ میلی‌متر بین کوپلر و رزوناتور

در نرم افزار شبیه سازی آشکارساز دو رزوناتوری با گپ ۰،۵ میلی-متر انجام شده و نتایج حاصل از آن در شکل ۵ نمایش داده‌شده‌است.

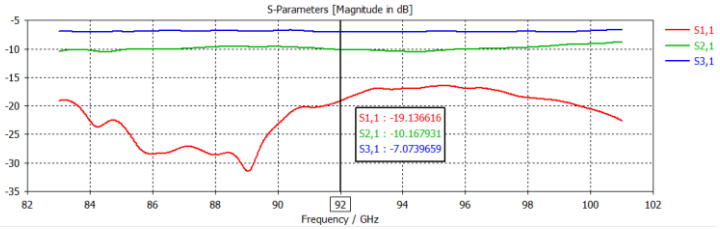


شکل ۵: پاسخ‌های فرکانسی آشکارساز موج میلی‌متری دو رزوناتوری قسمت ب

با توجه به شبیه‌سازی تلفات پورت ورودی ۰،۲۱۴ و ضریب کیفیت خروجی ۱۸۸،۴۴۵ می‌باشد.

ج) طراحی آشکارساز با در نظر گرفتن فاصله گپ ۱میلی‌متر بین کوپلر و رزوناتور

در نرم افزار شبیه سازی آشکارساز دو رزوناتوری با گپ ۱ میلی انجام شده و نتایج حاصل از آن در شکل ۶ نمایش داده‌شده‌است.



شکل ۶: پاسخ‌های فرکانسی آشکارساز موج میلی‌متری دو رزوناتوری قسمت ج

با توجه به شبیه‌سازی تلفات پورت ورودی ۰,۱۹۲ و ضریب کیفیت خروجی ۱۸۷,۱۶۵ می‌باشد .

د) مقایسه نتایج شبیه‌سازی آشکارساز موج میلی‌متری دو رزوناتوری

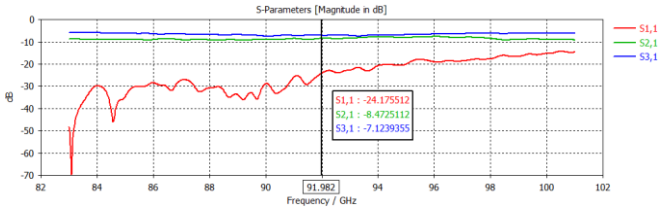
با توجه به مقایسه نتایج قسمت الف دارای پاسخ فرکانسی مطلوب-تر و قسمت ج دارای تلفات پورت ورودی پایین‌تر قسمت ب ضریب کیفیت خروجی بالاتر است.

۳-۳. طراحی آشکار ساز با چهار رزوناتور (آرایه دو رزوناتوری) در باند میلی‌متر

در این بخش آشکارساز موج میلی‌متری را با توجه به رزوناتور قسمت ۳-۱ و کوپلر طراحی شده قسمت۳-۲ شبیه سازی می‌کنیم. بین کوپلر و رزوناتور فاصله گپ۰,۱ ، ۰,۵ و ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌است.

الف) طراحی آشکارساز با در نظر گرفتن فاصله گپ ۰,۱ میلی‌متر بین کوپلر و رزوناتور

شبیه سازی آشکارساز چهار رزوناتوری با گپ ۰,۱ میلی انجام شده و نتایج حاصل از آن در شکل ۷ نمایش داده‌شده‌است.

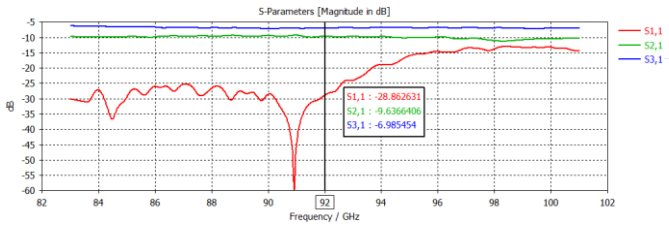


شکل ۷: پاسخ‌های فرکانسی آشکارساز موج میلی‌متری چهار رزوناتوری قسمت الف

با توجه به شبیه‌سازی تلفات پورت ورودی ۰,۳۳۷ و ضریب کیفیت خروجی ۱۸۸,۵۷۷ می‌باشد.

ب) طراحی آشکارساز با در نظر گرفتن فاصله گپ ۰,۵ میلی‌متر بین کوپلر و رزوناتور

در نرم افزار شبیه سازی آشکارساز چهار رزوناتوری با گپ ۰,۵ میلی‌متر انجام شده و نتایج حاصل از آن در شکل ۸ نمایش داده‌شده-است.

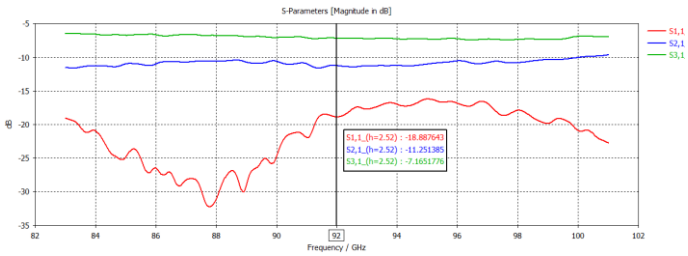


شکل ۸: پاسخ‌های فرکانسی آشکارساز موج میلی‌متری چهار رزوناتوری قسمت ب

با توجه به شبیه‌سازی تلفات پورت ورودی ۰,۳۲۷ و ضریب کیفیت خروجی ۱۸۸,۰۷۱ می‌باشد.

ج) طراحی آشکارساز با در نظر گرفتن فاصله گپ ۱ میلی‌متر بین کوپلر و رزوناتور

در نرم افزار شبیه سازی آشکارساز چهار رزوناتوری با گپ ۱ میلی‌متر انجام شده و نتایج حاصل از آن در شکل ۹ نمایش داده‌شده-است.



شکل ۹: پاسخ‌های فرکانسی آشکارساز موج میلی‌متری چهار رزوناتوری قسمت ج

با توجه به شبیه‌سازی تلفات پورت ورودی ۰,۲۸۸ و ضریب کیفیت خروجی ۱۸۴,۵۱۶ می‌باشد.

د) مقایسه نتایج شبیه‌سازی آشکارساز موج میلی‌متری چهار رزوناتوری

با توجه به مقایسه نتایج قسمت الف دارای پاسخ فرکانسی مطلوب-تر و قسمت ج دارای تلفات پورت ورودی پایین‌تر قسمت الف ضریب کیفیت خروجی بالاتر است.

۴. طراحی و شبیه‌سازی آشکارساز در باند زیرمیلی‌متری

۴-۱. طراحی رزوناتور مایکرو استریپی هیبرید جوزفسونی در باند زیرمیلی‌متری

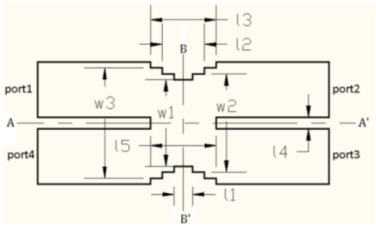
طراحی رزوناتور با ایتریم‌باریم‌کوپراکساید و میکا در نرم افزار مهندسی cst انجام شده و بهینه‌سازی شده و در جدول ۳ ابعاد این طراحی آورده شده‌است.

جدول ۳: مقادیر ابعاد رزوناتور موج زیرمیلی‌متری

ابعاد	میلی‌متر
عرض رزوناتور	۰,۵
طول رزوناتور	۱
ضخامت لایه ایتریم باریم کوپر اکساید	۰,۰۲
ضخامت لایه میکا	۰,۲
عرض فلز مس	۰,۰۲۵
ضخامت فلز مس	۰,۰۱۸

۴-۲.طراحی کوپلر تقسیم‌کننده توان مساوی در باند زیرمیلی‌متری

این کوپلر با توجه به مقاله مرجع [۷] شکل ۱۰ است. بعد از انجام طراحی اولیه و بهینه‌سازی با CST ابعاد جدول ۴ به عنوان ابعاد نهایی کوپلر به دست آمد. هم‌چنین با توجه به رزوناتور طراحی شده قسمت ۴-۱ کوپلر ۹۰ درجه طراحی شده‌است.

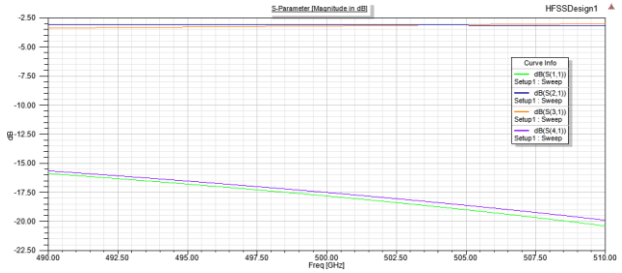


شکل ۱۰: شماتیک کوپلر ریبلت چند پله‌ای فرکانس زیرمیلی‌متری[۷]

جدول ۴: مقادیر ابعاد نهایی کوپلر ریبلت چند پله‌ای موج زیرمیلی‌متری

ابعاد	میلی‌متر
width coupler	۱,۱۴۶
leight coupler	۲,۹۶۹
thickness coupler	۰,۱۳۶
L1	۰,۱۶۸
L2	۰,۳۷۶
L3	۰,۶
L4	۰,۲
L5	۰,۶
W1	۰,۶۴۴
W2	۰,۸۵۸
W3	۰,۹۶۲

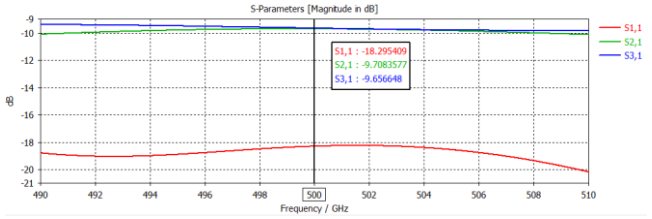
در شکل۱۱ نتایج شبیه سازی آورده شده‌است.



شکل ۱۱: پاسخ های فرکانسی کوپلر ریبلت زیرمیلی‌متری شبیه‌سازی شده با hfss

۴-۳.طراحی آشکار ساز با دو رزوناتور در باند زیرمیلی‌متری

در این بخش آشکارساز موج زیرمیلی‌متری را با توجه به رزوناتور و کوپلر طراحی شده قسمت۴-۱ و ۴-۲ و مرجع [۴] شبیه‌سازی می-کنیم. بین کوپلر و رزوناتور فاصله وکیوم۰,۱و ۰,۰۰۱میلی‌متر در نظر گرفته شده‌است و نتایج در شکل ۱۲ آورده شده است.

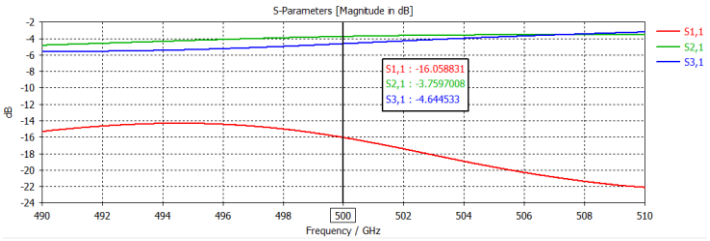


شکل ۱۲: پاسخ‌فرکانسی آشکارساز موج زیرمیلی‌متری دو رزوناتوری قسمت الف

با توجه به شبیه‌سازی تلفات پورت ورودی ۰,۱۷۳ و ضریب کیفیت خروجی ۲۶,۴۹۳ می‌باشد.

ب) طراحی آشکارساز با در نظر گرفتن فاصله وکیوم ۰,۰۰۱ میلی‌متر بین کوپلر و رزوناتورها

در نرم افزار شبیه سازی آشکارساز دو رزوناتوری با وکیوم ۰,۰۰۱ میلی‌متر انجام شده و نتایج حاصل از آن در شکل ۱۳ نمایش داده-شده‌است.



شکل ۱۳: پاسخ‌های فرکانسی آشکارساز موج زیرمیلی‌متری دو رزوناتوری قسمت ب

با توجه به شبیه‌سازی تلفات پورت ورودی ۰,۳۰۶ و ضریب کیفیت خروجی ۲۹,۱۷۲ می‌باشد.

ج) مقایسه نتایج شبیه‌سازی آشکارساز موج زیرمیلی‌متری دو رزوناتوری

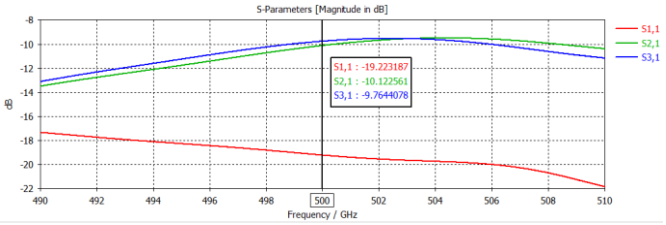
با توجه به مقایسه نتایج قسمت الف دارای پاسخ فرکانسی بازگشتی مطلوب‌تر و تلفات پورت ورودی پایین‌تر و قسمت ب دارای پاسخ فرکانسی عبوری مطلوب‌تر ضریب کیفیت خروجی بالاتر است.

۴-۴. طراحی آشکار ساز با چهار رزوناتور (آرایه دو رزوناتوری) در باند زیرمیلی‌متری

در این بخش آشکارساز موج زیرمیلی‌متری را با توجه به رزوناتور و کوپلر طراحی شده قسمت ۴-۱ و ۴-۲ شبیه‌سازی می‌کنیم. بین کوپلر و رزوناتور فاصله وکیوم ۰,۱ و ۰,۰۰۱میلی‌متر در نظر گرفته شده‌است.

الف) طراحی آشکارساز با در نظر گرفتن فاصله وکیوم ۰,۱ میلی‌متر بین کوپلر و رزوناتورها

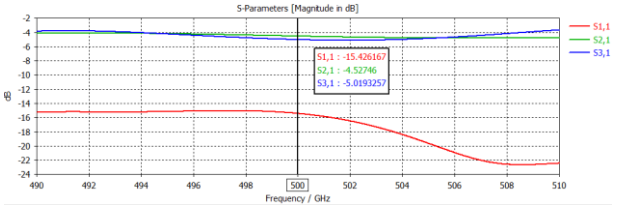
در شکل ۱۵ شبیه‌سازی آشکارساز چهار رزوناتوری با وکیوم ۰,۱ میلی‌متر و نتایج حاصل از آن در شکل ۱۴ نمایش داده‌شده‌است. با توجه به شبیه‌سازی تلفات پورت ورودی ۰,۲۳۸ و ضریب کیفیت خروجی ۲۵,۰۱۹ می‌باشد.



شکل ۱۴: پاسخ فرکانسی آشکارساز موج زیرمیلی‌متری چهار رزوناتوری قسمت الف

ب) طراحی آشکارساز با در نظر گرفتن فاصله وکیوم ۰,۰۰۱ میلی‌متر بین کوپلر و رزوناتورها

در نرم افزار شبیه‌سازی آشکارساز چهار رزوناتوری با وکیوم ۰,۰۰۱ میلی‌متر انجام شده و نتایج حاصل از آن در شکل ۱۵ نمایش داده‌شده‌است. با توجه به شبیه‌سازی تلفات پورت ورودی ۰,۴۲۷ و ضریب کیفیت خروجی ۲۶,۴۵۳ می‌باشد.



شکل ۱۵: پاسخ فرکانسی آشکارساز موج زیرمیلی‌متری چهار رزوناتوری قسمت ب

ج) مقایسه نتایج شبیه‌سازی آشکارساز موج زیرمیلی‌متری چهار رزوناتوری

با توجه به مقایسه نتایج قسمت الف دارای پاسخ فرکانسی بازگشتی مطلوب‌تر و تلفات پورت ورودی پایین‌تر و قسمت ب دارای پاسخ فرکانسی عبوری مطلوب‌تر و ضریب کیفیت خروجی بالاتر است.

۵. نتیجه‌گیری

طراحی آشکارساز مبتنی بر کوپلر و رزوناتور در حوزه میلی‌متری در مجموع در فاصله گپ یک‌دهم میلی‌متر پاسخ‌های مطلوب‌تری به دست آوردیم.طراحی آشکارساز مبتنی بر کوپلر و رزوناتور در حوزه زیرمیلی متری پاسخ‌های مطلوب تری دارد. استفاده از ابررسانای ایتریم‌باریم‌کوپراکساید مزیت این ساختار است که نسبت به سیلیکون به صورت راحت‌تر و صرفه هزینه کم‌تر فراهم می‌شود و بهبود پاسخ‌ها را فراهم می‌کند. هم‌چنین در طراحی زیرمیلی‌متری با فاصله وکیوم یک‌هزارم میلی‌متر پاسخ های فرکانسی عبوری مطلوب‌تری در حدود شش دسی‌بل و ضریب کیفیت بالاتری نسبت به فاصله یک‌دهم میلی-متری در برداشت و در باند زیرمیلی‌متری ابعاد را خیلی کوچک‌تر طراحی کردیم که مزیتی برای ساخت می‌باشد.

مراجع

[1] L. Yujiri, “Passive millimeter wave imaging,” *IEEE microwave magazine*, vol. 4, No. 3, Sep, pp. 39-50, 2003.

[2] Y. Zhang, Q. Wang and J. Ding, “A cross-guide waveguide directional coupler with high directivity and broad bandwidth,” *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 23, No. 11, Sep, pp. 581-583, 2013.

[3] D. M. Pozar, *Microwave engineering*, , U.S: John Wiley & Sons, 2009

[4] O. Pustylnik, V. Grmalsky, S. Koshevaya, M. T. Torres and J. E. Alatorre, “Millimeter waves detector based on Josephson’s junctions with optimal substrate,” *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, vol. 287, No. 24, Feb, pp. 1-5, 2006.

[5] M. A. Hein, “Perspectives of Superconducting MgB2 for microwave applications,” *Invited paper at the General Assembly of URSI, Maastrich*, Aug, pp. 17-24, 2002.

[6] K. Kuroiwa, A. Gonzalez, M. Koyano, T. Kojima, Y. Fujii and Y. Uzawa, “Short-slot Hybrid Coupler Using Linear Taper in W-band,” *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol. 34, No. 12, Dec, pp. 815-823, 2013.

[7] W. Wang, X. Shui and X. Wang, “Reseach of terahertz narrow-wall 3dB coupler on silicon-substrate,” *in 22nd Wireless and Optical Communication Conference, IEEE*, May, pp. 586-588, 2013.