طراحی و ساخت فیلتر میانگذر باند باریک مایکرواستریپ ابررسانا

حجت اله جاوید[۱] علی بنایی[۲] مهدی فردمنش[۳] یورگن شوبرت[۴] مارکو بنزن[۵]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی شریف- تهران- ایران
hojjatjavid@gmail.com

۲- دانشیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی شریف- تهران- ایران
banai@sharif.edu

۳- دانشیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی شریف- تهران- ایران
fardmanesh@sharif.edu

۴- استاد- مرکز تحقیقات یولیش- یولیش - آلمان
J.Schubert@fz-juelich.de

۵- استاد- مرکز تحقیقات یولیش- یولیش - آلمان
M.Banzet@fz-juelich.de

چکیده: یک فیلتر ۴ قطبی میان‌گذر ابررسانای دمای بالا (HTS) با پاسخ فرکانسی شبه بیضوی طراحی و ساخته شد. ساختار فیلتر مایکرواستریپ و پیکربندی به گونه‌ای پیاده سازی شده است که دو صفر انتقال در دو لبه پاسخ فرکانسی فیلتر ظاهر شده و گزینش فیلتر افزایش یابد. با استفاده از مشددهای با ساختار فشرده مشخصه‌های فیلتر با فرکانس مرکزی 3.25GHz و پهنای باند 3% بر روی زیرلایه‌ای با ابعاد $10mm\times10mm$ به دست آمده است. فیلتر طراحی شده با استفاده از یک فیلم نازک یک طرفه YBCO بر روی زیرلایه کریستالی $LaAl_2O_3$ به ضخامت 1mm ساخته شده است. مشخصه های اندازه‌گیری شده فیلتر ساخته شده در دمای نیتروژن مایع با انطباق بسیار خوبی با نتایج شبیه‌سازی منتج به کمترین تلف باند عبور حدودا 0.5dB شده و همچنین پهنای باند برای نقاط با تلف 1dB پایین تر از حداقل تلف باند عبور 110MHz اندازه گیری شد.

کلمات کلیدی: فیلتر مایکرواستریپ، فیلتر ابررسانا، فیلتر میانگذر، ابررسانای دمای بالا

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۸۷/۹/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۸۸/۹/۳۰

نام نویسنده‌ی مسئول : مهندس حجت اله جاوید

نشانی نویسنده‌ی مسئول : ایران – تهران – خیابان آزادی – دانشگاه صنعتی شریف – ساختمان جدید دانشکده‌ی برق- زیرزمین منهای یک- اتاق ۱۰- آزمایشگاه ابررسانایی

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-02]

۱- مقدمه

استفاده از ابررسانا به جای رسانای فلزی در فیلترهای مسطح امکان کوچک سازی این نوع فیلترها تا حد نسبتا زیادی بدون آنکه تلف تبدیل فیلتر زیاد شود را فراهم کرده است و به این ترتیب با استفاده از تکنولوژی ابررسانایی نسل جدیدی از فیلترهای مایکروویو به نام فیلترهای مینیاتوری ابررسانا ساخته شده است[1]. کوچک بودن فیلترهای ابررسانا به نوبه خود باعث پایین آمدن هزینه ساخت و همچنین پایین آمدن هزینه سرمایشی فیلتر نیز می‌شود. با توجه به این مطلب که ساخت یک زیرلایه تک کریستالی و همچنین لایه نشانی یک فیلم ابررسانای دمای بالای کاملا همگن بر روی یک سطح بزرگ پر هزینه و دشوار می‌باشد[2]. لازم به ذکر است حداکثر سایز ویفرهای موجود جهت ساخت فیلترهای HTS ، عموما ۲ و یا ۳ اینچ مربع می‌باشد، که بسته به فرکانس کاری فیلتر باید فیلم با ابعاد مناسب را انتخاب نمود. تاکنون ساخت فیلتر میان‌گذر ابررسانا در فرکانسهای مایکروویو از 1GHz تا حدود 35GHz برای استفاده در کاربردهای مختلف گزارش شده است[1,3].

فیلترهایی که با استفاده از تکنولوژی ابررسانایی ساخته می‌شوند دارای مزیتهایی نسبت به فیلترهای معمول مایکروویو به شرح زیر می باشند:

۱- تلفات انتقال کم
۲- گزینش بسیار بهتر
۳- عدد نویز بسیار کم
۴- سایز کوچک تر و وزن کمتر نسبت به فیلترهای مایکروویو با کارایی مشابه.

پیشرفت سریع مخابرات بیسیم و همچنین مخابرات موبایل و نیاز روز افزون این صنعت در حال رشد به سخت افزارهای با کیفیت و راندمان بالاتر، پتانسیل قوی برای استفاده از تکنولوژی ابررسانایی دمای بالا را فراهم آورده است. به عنوان مثال استفاده از ادوات ابررسانای دمای بالا در سیستم BTS شبکه موبایل باعث کاهش قابل ملاحظه نویز و همچنین کوچک شدن ابعاد سیستم و مزیتهای قابل توجه دیگر در کارکرد سیستم می‌شود. در حال حاضر در کشور آمریکا و اروپا از فیلترهای مایکروویو ابررسانا در BTS شبکه های تلفن همراه استفاده می شود، که استفاده از این نوع فیلترها باعث افزایش کیفیت مکالمات سلول تحت پوشش BTS و کاهش تماسهای ناموفق شده است[4].

همچنین استفاده از این نوع فیلترها در کاربردهای نظامی نیز مد نظر قرار گرفته است. برای مثال فیلتر باند S گزارش شده در این مقاله قابلیت استفاده در رادارهای داپلر را دارد، که در این صورت هم مشکل حجیم بودن فیلترهای موجبری که در در ین نوع رادارها استفاده می‌شود برطرف می‌شود و هم به علت تلف بسیار کم و گزینش بهتری که این نوع فیلترها دارند برد رادار به میزان محسوسی افزایش خواهد یافت.

با توجه به مزیتها و کاربردهای منحصر به فردی که فیلترهای ابررسانا و به طور کلی تکنولوژی ابررسانایی مایکروویو می‌تواند داشته باشد، برای ورود به این تکنولوژی برای اولین بار در کشور در این مقاله طراحی و ساخت یک فیلتر مایکروویو مینیاتوری در باند S با استفاده از تکنولوژی ابررسانایی گزارش شده است. این فیلتر باند S جزء یکی از فشرده‌ترین فیلترهای مشابه که تاکنون گزارش شده می‌باشد، و بر روی فیلم ابررسانای YBCO به ضخامت 400nm به سطح $1cm^2$ ساخته شده است.

۲- طراحی فیلتر

هدف طراحی فیلتر مایکرواستریپ میانگذر ۴ قطبی با فرکانس مرکزی 3.25GHz و پهنای باند حدود ۳٪ در ابعاد $1cm \times 1cm$ بر روی زیرلایه $LaAl_2O_3$ به ضخامت 1mm می‌باشد. فیلتر با چینش ۴ مشدد مایکرواستریپ مدار باز با طول حدود $\lambda/2$ در کنار یکدیگر پیاده‌سازی شده است.

در تمام مراحل طراحی فیلتر از نرم افزار شبیه‌ساز تمام‌موج IE3D که مدل ابررسانا را شامل می‌شود، استفاده شد[4]. در واقع نرم افزار قابلیت شبیه سازی مدارهای مسطح ابررسانا را با استفاده از این مدل فراهم کرده است. برای مدل کردن ابررسانا پارامترهای عمق نفوذ، دمای بحرانی ابررسانا، دمای ابررسانا، مقاومت سطحی ابررسانا و فرکانسی که مقاومت سطحی در آن اندازه گیری شده باید به شبیه‌ساز داده شود. پارامترهای داده شده برای شبیه‌سازی فیلتر با توجه به اینکه ابررسانای استفاده شده YBCO بوده و برای سرد کردن آن از نیتروژن مایع استفاده شده است به ترتیب زیر می‌باشد[7]:

$\lambda = 200nm$
$T_c=98\ k$
$T=77\ k$
$R_s = 2\times10^{-5}\Omega$
$f=2GHz$

ضریب دی‌الکتریک مؤثر برای خط مایکرواستریپ در فرکانس 3.25GHz با زیرلایه $LaAl_2O_3$ به ضخامت 1mm و ضریب دی الکتریک واقعی $\varepsilon_r=24$ مقداری در حدود ۱۴ تا ۱۵ خواهد بود $(\varepsilon_{eff} = 14 \sim 15)$، که البته زیاد بودن ضریب دی الکتریک موثر به نوبه خود باعث کوچک شدن ابعاد مشدد می شود، اما با توجه به اینکه باز طول مشدد مایکرواستریپ $\lambda/2$ در فرکانس 3.25GHz و با این ضریب دی‌الکتریک موثر در حدود 13mm خواهد شد، در مقایسه با ابعاد $10mm \times 10mm$ زیرلایه لزوم طراحی یک مشدد فشرده برای پیاده سازی بر روی این زیرلایه مشخص می شود.

در نهایت کوچک ترین ساختار برای مشدد 3.25GHz مطابق شکل (۱) طراحی شد. همانطور که مشاهده می‌کنید در دو سر مدار باز مشدد دو خط ضخیم با پهنای 0.375mm اضافه شده است، که این بخش مانند یک گپ خازنی عمل می‌کند، که به صورت موازی با مشدد $\lambda/2$ در نظر گرفته می شود و باعث می‌شود در فرکانس ثابت طول خط کمتر شود. همچنین در شکل (۱) پاسخ فرکانسی مشدد ابررسانا نیز

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-02]

نشان داده شده است، فرکانس تشدید مشدد همانطور که در شکل مشاهده می کنید در فرکانس 3.25GHz قرار گرفته است.

پس از طراحی مشدد مناسب نوبت به طراحی فیلتر با چینش این مشددها در کنار هم می رسد. تابع شبه‌بیضوی به عنوان پاسخ فرکانسی فیلتر در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل (۲) پاسخ فرکانسی شبه بیضوی هم گزینش بهتری نسبت به پاسخ فرکانسی چبی‌شف دارد و هم ضریب بازتاب بهتری در باند عبور نسبت به پاسخ فرکانسی بیضوی دارد و بنابراین مزیت هر دو نوع پاسخ فرکانسی را با هم شامل می‌شود. پاسخ فرکانسی شبه بیضوی شامل دو صفر انتقال محدود در دو لبه باند گذر می‌باشد (مطابق شکل (۲)). برای تحقق دو صفر انتقال محدود می‌بایست بین دو مشدد غیر متوالی در ساختار فیلتر تزویجی با ضریب تزویج مخالف سایر ضرایب تزویج بین مشددهای متوالی ایجاد کرد[7]. مدار معادل فیلتر پایین‌گذر اولیه این نوع پاسخ فرکانسی در شکل (۳) نشان داده شده است. با توجه به مدار معادل می‌بایست بین مشددهای غیرمتوالی m-1 و m+1 تزویج مخالف ایجاد کرد که ساختار مشدد طراحی شده این خاصیت را نیز می‌تواند برآورده کند. مقادیر عناصر فیلتر پایین‌گذر اولیه چهار قطبی شبه بیضوی با بیشترین گزینش (صفرهای انتقال تا حد امکان نزدیک به لبه‌های باند عبور) با استفاده از جدولهای مرجع [7] به صورت زیر می‌باشد:

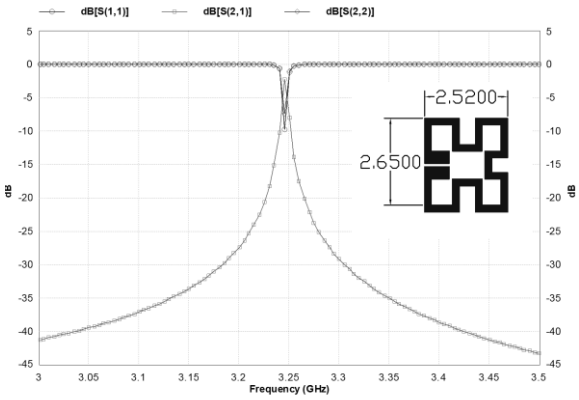
$$\begin{aligned} g_1 &= 0.95974 \\ g_2 &= 1.42192 \\ J_1 &= -0.21083 \\ J_2 &= 1.11769 \end{aligned} \qquad (۱)$$

مقادیر ضرایب تزویج بین مشددها و ضریب کیفیت مشددهای ورودی و خروجی عناصر فیلتر میان‌گذر نیز با استفاده از نگاشت فرکانسی و مقادیر عناصر فیلتر پایین‌گذر اولیه به کمک روابط زیر به دست می آید[8]:

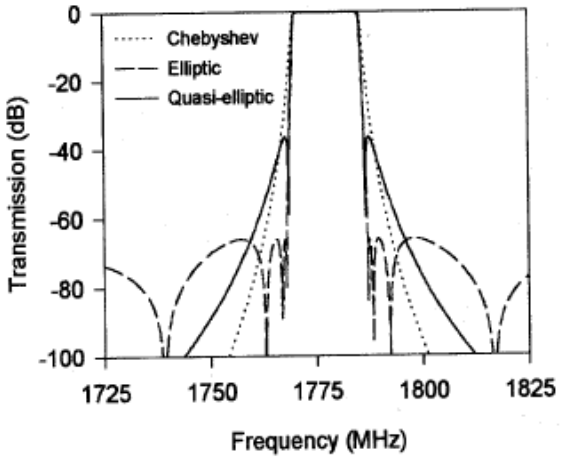
$$\begin{aligned} Q_{ei} &= Q_{eo} = \frac{g_1}{FBW} \\ M_{i,i+1} &= M_{n-i,n-i+1} = \frac{FBW}{\sqrt{g_i g_{i+1}}} \qquad for \quad i=1 \quad to \quad m-1 \\ M_{m,m+1} &= \frac{FBW.J_m}{g_m} \\ M_{m-1,m+2} &= \frac{FBW.J_{m-1}}{g_{m-1}} \end{aligned} \qquad (۲)$$

به این ترتیب ضرایب تزویج و ضریب کیفیت برای فیلتر میان‌گذر ۴ قطبی با پهنای باند ۳٪ (*FBW=0.03*) با توجه به روابط ۲ به دست می‌آیند:

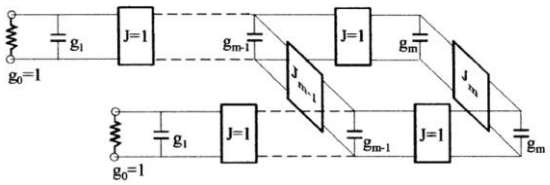
$$\begin{aligned} Q_{ei} &= Q_{eo} = 31.9913 \\ M_{1,2} &= M_{3,4} = 0.0257 \\ M_{2,3} &= 0.0236 \\ M_{1,4} &= -0.00673 \end{aligned} \qquad (۳)$$



شکل(۱): شمای مشدد فشرده طراحی شده و پاسخ فرکانسی آن



شکل (۲): پاسخ فرکانسیهای سه نوع فیلتر میانگذر[6]



شکل (۳): مدار معادل فیلتر پایین‌گذر با یک جفت صفر انتقال محدود[7]

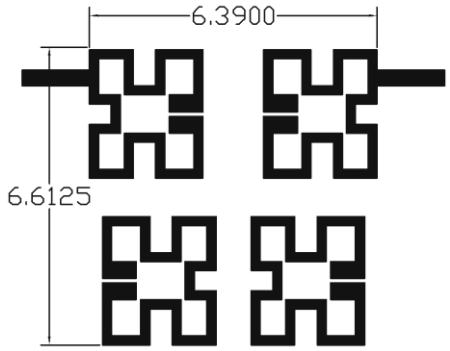
مرحله بعد طراحی فیلتر به دست آوردن نمودار فاصله بین مشددها و همچنین موقعیت خط تغذیه ورودی-خروجی بر حسب ضرایب تزویج و ضریب کیفیت می باشد، تا با استفاده از این نمودارها مشخصات ساختار فیزیکی فیلتر به دست آید. با توجه به تقارن مشددها نسبت به محور yها دو مشدد به سه صورت مختلف می‌توانند در کنار یکدیگر قرار گیرند که برای هر حالت باید جداگانه نمودار ضریب تزویج بر حسب فاصله بین مشددها را به دست آورد. برای استخراج نمودارها نیز از شبیه ساز الکترومغناطیسی تمام موج IE3D و مدل ابررسانای آن استفاده شده است. با توجه به این نمودارها و مقادیر به دست آمده برای ضرایب تزویج و ضریب کیفیت، مشخصات فیزیکی فیلتر به صورت زیر به دست آمد:

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.6- No.2- Fall & Winter 2009
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-02]

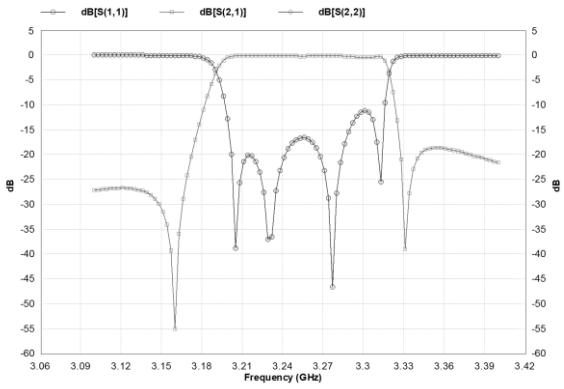
$$D_{12} = 0.8mm$$
$$D_{23} = 0.75mm$$
$$D_{14} = 1.35mm \qquad (۴)$$
$$T = 0.45mm$$

که D_{nm} فاصله بین مشددهای nام و mام و T فاصله خط تغذیه ورودی-خروجی از ضلع بالای مشدد ابتدایی و انتهایی می‌باشد. شمای فیلتر طراحی شده با مشخصات فوق در شکل (۴) مشاهده می‌شود. همچنین پاسخ فرکانسی فیلتر ابررسانا حاصل از شبیه‌سازی با شبیه‌ساز IE3D در شکل (۵) نشان داده شده است. حداقل تلف باند عبور محاسبه شده با استفاده از شبیه‌سازی 0.1dB- به دست آمد.

همچنین در شکل (۶) پاسخ فرکانسی حاصل از شبیه‌سازی همین فیلتر زمانی که جنس استریپها از فلز مس باشد، را مشاهده می‌کنید. با مقایسه دو شکل (۵) و (۶) مزیت فیلتر ابررسانا نسبت به فیلتر مشابه فلزی به وضوح دیده می‌شود. تلف باند عبور فیلتر ابررسانا حداقل 2dB بهتر از فیلتر مشابه فلزی می‌باشد و همچنین گزینش بهتر فیلتر ابررسانا نسبت به فیلتر عادی با توجه به شکل مشهود است.



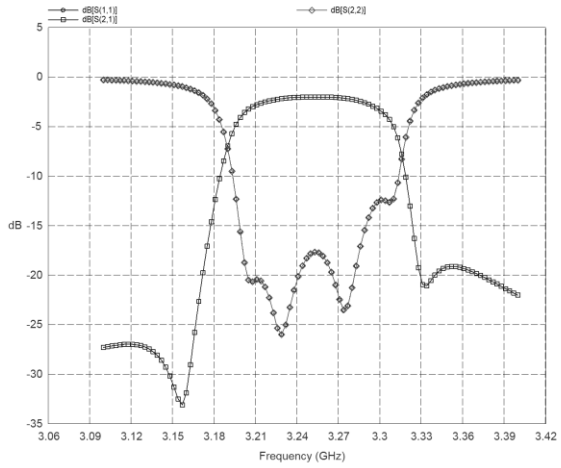
شکل (۴): طرح فیلتر مایکرواستریپ میانگذر ۴ قطبی



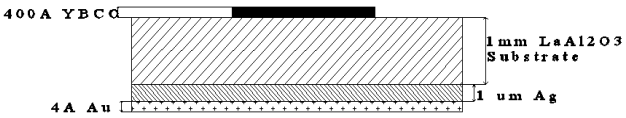
شکل (۵): پاسخ فرکانسی حاصل از شبیه‌سازی فیلتر میانگذر

۳- ساخت فیلتر ابررسانا و اندازه گیریها

فیلتر ابررسانا با استفاده از یک فیلم نازک ابررسانای دمای بالا از جنس سرامیک Y1Ba2Cu3O7-x به ضخامت ۴۰۰ نانومتر، لایه نشانی



شکل (۶): پاسخ فرکانسی حاصل از شبیه‌سازی فیلتر از جنس مس روی زیر لایه از جنس LaAl2O3 به ضخامت 1mm



شکل (۷): برش از سطح مقطع فیلتر

شده توسط سیستم "Puls Laser Deposition" بر روی زیرلایه LaAl2O3 به ابعاد $10mm \times 10mm \times 1mm$ در مرکز تحقیقات یولیش آلمان ساخته شده است. YBCO فقط در یک طرف زیرلایه لایه نشانی شده است و بنابراین برای ایجاد صفحه زمین در طرف دیگر زیرلایه یک لایه نقره با استفاده از دستگاه Magnetron Sputtering لایه نشانی شده و برای محافظت نقره از اکسید شدن، سطح نقره با استفاده از یک لایه طلا پوشانده شده است. برای پیاده‌سازی طرح بر روی فیلم YBCO از فرآیند فوتولیتوگرافی استفاده شده و دقت فوتولیتوگرافی انجام شده در حد چند مایکرون بوده که برای فیلترهای باند S این دقت مناسب می‌باشد. در شکل (۷) یک برش از سطح مقطع فیلتر نشان داده شده است.

جهت محافظت فیزیکی از فیلتر، پایین آوردن تلفات تشعشعی، مقابله با سیگنالهای تداخلی محیط و همچنین ایجاد بستر برای اتصال مناسب بین فیلتر و SMA، یک جعبه فلزی مناسب طراحی شده است. جعبه مناسب برای فیلتر HTS باید دارای مشخصات زیر باشد:

۱- انطباق ضریب انبساط جعبه و زیرلایه فیلتر
۲- مقاومت الکتریکی مناسب
۳- مقاوم بودن در برابر اکسید شدن

چون این نوع فیلترها در دماهای بسیار پایین (در اینجا دمای جوش نیتروژن مایع در حدود 77K) مورد استفاده قرار می‌گیرند، از این رو در یک مدت زمان کوتاه دمای فیلتر می‌بایست از دمای اطاق به میزان حدود ۲۰۰ درجه سانتیگراد کاهش یابد. لذا میزان انبساط و انقباض در این محدوده دمایی وسیع بسیار زیاد خواهد بود. با توجه به اینکه

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-02]

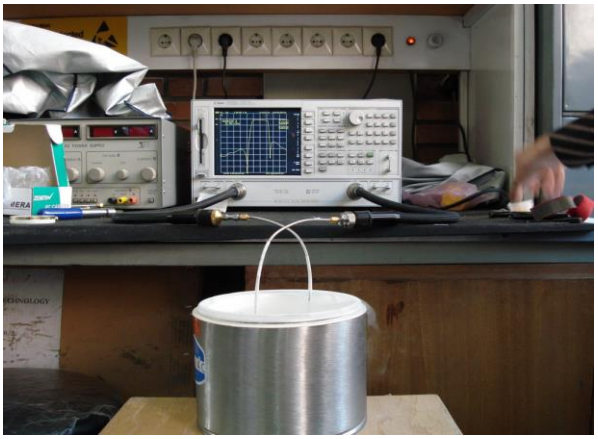
لایه زمین فیلم ابررسانا با استفاده از چسب نقره به کف جعبه چسبانده می‌شود، عدم انطباق ضریب حرارتی بین زیرلایه و جعبه باعث سست شدن اتصال بین لایه زمین زیرلایه و جعبه و ایجاد اثر مخرب در پاسخ فیلتر می‌شود و حتی در صورتی که این عدم انطباق از حدی بیشتر باشد، زیرلایه به طور کلی از جعبه جدا خواهد شد. بنابراین جنس جعبه باید از فلزی انتخاب شود که بیشترین انطباق ضریب انبساط را با زیرلایه داشته باشد. جنس زیرلایه مورد استفاده $LaAl_2O_3$ می‌باشد، که ضریب انبساط حرارتی آن $10\ \mu m.m^{-1}.K^{-1}$ می‌باشد. از بین فلزات در دسترس تیتانیوم با ضریب انبساط $8.6\ \mu m.m^{-1}.K^{-1}$ دارای بهترین انطباق ضریب انبساط با $LaAl_2O_3$ می‌باشد. نهایتا یک قطعه U شکل به عنوان حامل زیرلایه از جنس تیتانیوم ساخته شده و زیرلایه بر روی این حامل تیتانیوم چسبانده و حامل تیتانیوم درون یک جعبه از جنس برنج پیچ شده است. همچنین جهت کم کردن مقاومت الکتریکی تیتانیوم و برنج و همچنین جلوگیری از اکسید شدن آنها سطح حامل تیتانیوم و جعبه برنجی با یک لایه طلا پوشانده شد. در طراحی جعبه ابعاد زیرلایه، مکان خط تغذیه ورودی-خروجی فیلتر، ابعاد SMA و تا حد امکان کم کردن اثر دیواره‌ها لحاظ شده است.

برای ایجاد اتصال اهمی مناسب بین فیلتر و SMA بر روی خط تغذیه ورودی-خروجی یک لایه طلا با استفاده از Magnetron Sputtering لایه‌نشانی شد. سپس SMA با استفاده از چسب نقره به لایه طلای خط تغذیه متصل شد. در شکل (۸) تصویر فیلتر و جعبه آن نشان داده شده است که ابعاد جعبه $3cm \times 1.8cm \times 1.2cm$ می‌باشد.

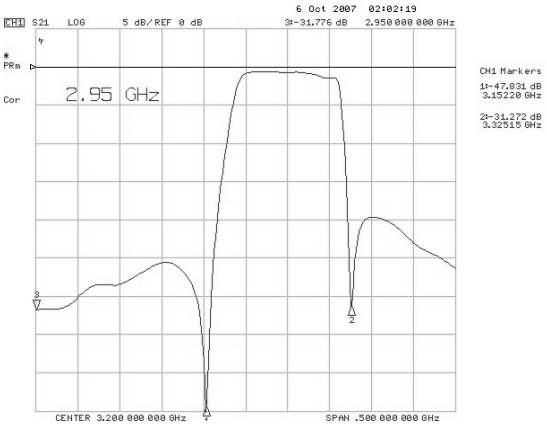
برای اندازه گیری پارامترهای S فیلتر از یک تحلیل‌گر شبکه مدل Agilent 8722ES استفاده شده و فیلتر درون نیتروژن مایع یعنی دمای ۷۷ درجه کلوین قرار داده شد. در شکل (۹) سیستم اندازه‌گیری و تجهیزات سرمایشی مورد استفاده نشان داده شده است. نتیجه اندازه گیری پارامتر S_{21} فیلتر (تلف تبدیل فیلتر) با استفاده از تحلیل‌گر شبکه در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود. با توجه به شکل (۱۰) پاسخ فرکانسی فیلتر شبه بیضوی با دو صفر انتقال محدود در دو لبه باند گذر می‌باشد. حداقل تلف باند گذر حدود 0.5dB اندازه‌گیری شده است. پهنای باند عبور در نقاط 1dB پایین‌تر از نقطه تلف حداقل، 110MHz با فرکانس مرکزی 3.25GHz به دست آمده است. همچنین پاسخ فرکانسی فیلتر تا فرکانس 10GHz در شکل (۱۱) نشان داده شده، مشاهده می‌شود که اسپورهای پاسخ فیلتر در فرکانسهایی بالاتر از 7GHz اتفاق می‌افتند.

در شکل (۱۲) منحنیهای اندازه‌گیری و شبیه‌سازی مربوط به پاسخ فیلتر در یک شکل رسم شود که بتوان داده‌های اندازه‌گیری و شبیه-سازی را مقایسه کرد. همانطور که مشاهده می کنید علیرغم آنکه نتایج آزمایشگاهی بسیار خوبی به دست آمده، اندکی اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. فرکانس مرکزی و پهنای باند اندازه گیری شده اندکی کمتر از نتایج شبیه سازی به دست آمده، که علت آن را می‌توان به اختلاف ضخامت زیرلایه مورد استفاده

شکل (۸): تصویر فیلتر ابررسانا و جعبه آن

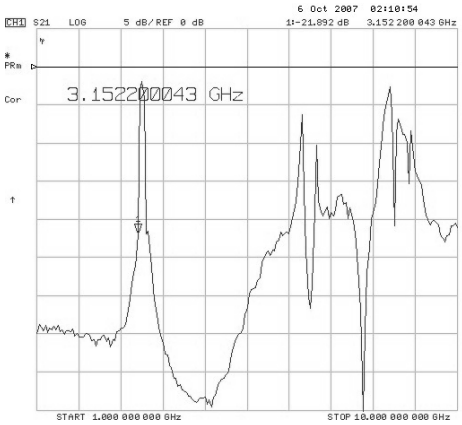


شکل (۹): سسیتم اندازه گیری مشخصات فیلتر ابررسانا

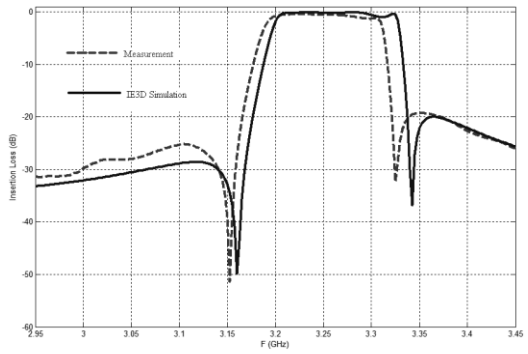


شکل (۱۰): پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری شده فیلتر

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.6- No.2- Fall & Winter 2009
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-02]



شکل(۱۱): پاسخ فرکانسی پهن باند فیلتر (span=9GHz)



شکل (۱۲): مقایسه پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری شده و حاصل از شبیه سازی فیلتر

در عمل با ضخامت در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی و همچنین اثر دیواره بالای جعبه مربوط دانست. مقدار کمی تغییر در ضخامت زیرلایه موجب جابجایی فرکانس مرکزی خواهد شد و در این مورد نیز ظاهرا ضخامت زیرلایه بیشتر از 1mm بوده است. همچنین تلف باند عبور اندازه‌گیری شده به میزان 0.3dB بیشتر از نتایج شبیه سازی به دست آمده، که علت آن بخشهای غیر ابررسانای فیلتر از جمله SMA، خط تغذیه ورودی و خروجی که روی آنها طلا لایه نشانی شده و چسب نقره‌ای که برای اتصال SMA به خط تغذیه مورد استفاده قرار گرفته شد، می‌باشد.

۴- نتیجه گیری

یک فیلتر مایکرواستریپ میان‌گذر با استفاده از یک فیلم نازک ابررسانای YBCO طراحی و ساخته شده است. پاسخ فرکانسی فیلتر از نوع شبه بیضوی با یک جفت صفر انتقال محدود می‌باشد، که هم گزینش خوبی در اختیار قرار می‌دهد و هم ضریب بازتاب مناسبی در باند عبور دارد. فیلتر ساخته شده برای کار در فرکانس 3GHz حجم بسیار کمتری نسبت انواع فیلترهای مشابه دارد، در حالی که کارایی بهتری از جمله تلف تبدیلی در حد 0.5dB در اختیار قرار می‌دهد.

قدردانی و تشکر

بدین وسیله از مرکز تحقیقات مخابرات ایران که قسمتی از حمایت مالی این پروژه را عهده دار شد و همچنین مهندس فؤاد اروانی که در مراحل ساخت مشارکت داشتند قدردانی به عمل می‌آید.

مراجع

[1] Lancaster, M. J., Huang, F., Avenhaus, A. B. P., Hong, J.H., Hung, D., "Miniature Superconducting Filters", IEEE Trans. Micrw. Theory Tech. , VOL. 47, NO. 7 , July 1996
[2] Zeng, H. K., Wei-Hsiu, A.H, Wu, S., Lin, J. Y., Wu, K.H., Juang, J.Y., Uen, T.M., Gou, Y.S., Kuo, J.T., "Miniaturized 3 GHz Cross-Coupled Planar Microwave Filters", IEEE Trans. Applied Superconductivity, VOL. 14, NO. 1, March 2004.
[3] Swanson, D. J., Roger, J., Forse, J., "An HTS End-Coupled CPW Filter At 35 GHZ", IEEE MTT-S Digest, 1994
[4] Hong, J.S., Lancaster, M.J., Jedamzik, D., Greed, R.B., "On the Development of Superconducting Microstrip Filters for Mobile Communications Applications", IEEE Trans. Microw. Theory Tech. , VOL. 47, NO. 9, Sep.1999
[5] Zeland Software Inc., IE3D Simulator, Jan. 2002.
[6] http://www.edt.bham.ac.uk
[7] Hong, J. -S., Lancaster, M. J., Microstrip Filters for RF/Microwave Application, John Wiley, 2001
[8] Matthaei, G., Young, L. Jones, E.M.T., Microwave Filters, Impedance-Matching , Networks, and Coupling Structures, Artech House, 1980

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-02]