

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 پیاده‌سازی شده است که دو صفر انتقال در دو لبه پاسخ فرکانسی فیلتر ظاهر شده و گزینش فیلتر افزایش یابد. با استفاده از مشدهای با ساختار فشرده مشخصه‌های فیلتر با فرکانس مرکزی 3.25GHz و پهنای باند 3% بر روی زیرلایه‌ای با ابعاد $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ به دست آمده است. فیلتر طراحی شده با استفاده از یک فیلم نازک یک طرفه YBCO بر روی زیرلایه کریستالی LaAlO_3 به ضخامت 1mm ساخته شده است. مشخصه‌های اندازه‌گیری شده فیلتر ساخته شده در دمای نیتروژن مایع با انطباق بسیار خوبی با نتایج شبیه‌سازی منتج به کمترین تلف باند عبور حدوداً 0.5dB شده و همچنین پهنای باند برای نقاط با تلف 1dB پایین تر از حداقل تلف باند عبور 110MHz اندازه‌گیری 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

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 ابرسانایی گزارش شده است. این فیلتر باند S جزء یکی از فشرده‌ترین فیلترهای مشابه که تاکنون گزارش شده می‌باشد، و بر روی فیلم ابرسانای 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 $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ 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 ابرسانا را شامل می‌شود، استفاده شد [4]. در واقع نرم افزار قابلیت شبیه سازی مدارهای مسطح ابرسانا را با استفاده از این مدل فراهم کرده است. برای مدل کردن ابرسانا پارامترهای عمق نفوذ، دمای بحرانی ابرسانا، دمای ابرسانا، مقاومت سطحی ابرسانا 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 ابرسانای استفاده شده YBCO بوده و برای سرد کردن آن از نیتروژن مایع استفاده شده است به ترتیب زیر می‌باشد [7]:

$$\begin{aligned} \lambda &= 200\text{nm} \\ T_c &= 98\text{K} \\ T &= 77\text{K} \\ R_s &= 2 \times 10^{-5} \Omega \\ f &= 2\text{GHz} \end{aligned}$$

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

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 می‌شود و باعث می‌شود در فرکانس ثابت طول خط کمتر شود. همچنین در شکل (۱) پاسخ فرکانسی مشدد ابرسانا نیز

استفاده از ابرسانا به جای رسانای فلزی در فیلترهای مسطح امکان کوچک سازی این نوع فیلترها تا حد نسبتاً زیادی بدون آنکه تلف تبدیل فیلتر زیاد شود را فراهم کرده است و به این ترتیب با استفاده از تکنولوژی ابرسانایی نسل جدیدی از فیلترهای مایکروویو به نام فیلترهای مینیاتوری ابرسانا ساخته شده است [1]. کوچک بودن فیلترهای ابرسانا به نوبه خود باعث پایین آمدن هزینه ساخت و همچنین پایین آمدن هزینه سرمایه‌ی فیلتر نیز می‌شود. با توجه به این مطلب که ساخت یک زیرلایه تک کریستالی و همچنین لایه نشانی یک فیلم ابرسانای دمای بالای کاملاً همگن بر روی یک سطح بزرگ پر هزینه و دشوار می‌باشد [2]. لازم به ذکر است حداکثر سایز ویفرهای موجود جهت ساخت فیلترهای HTS، عموماً 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 ابرسانا در فرکانسهای مایکروویو از 1GHz تا حدود 35GHz برای استفاده در کاربردهای مختلف گزارش شده است [1,3].

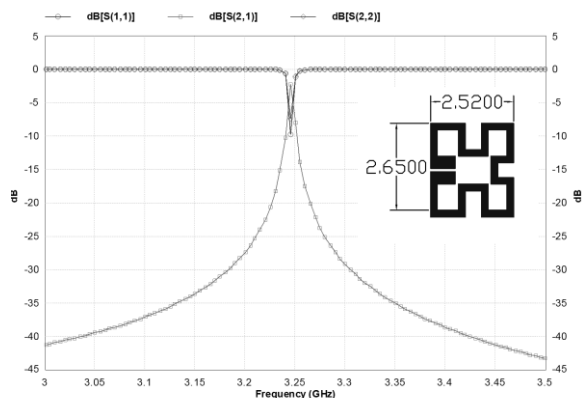
فیلترهایی که با استفاده از تکنولوژی ابرسانایی ساخته می‌شوند دارای مزیت‌هایی نسبت به فیلترهای معمول مایکروویو به شرح زیر می‌باشند:

- 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.

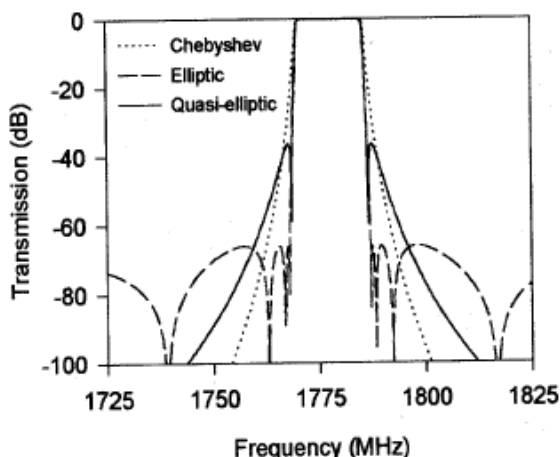
پیشرفت سریع مخابرات بیسیم و همچنین مخابرات موبایل و نیاز روز افزون این صنعت در حال رشد به سخت افزارهای با کیفیت و راندمان بالاتر، پتانسیل قوی برای استفاده از تکنولوژی ابرسانایی دمای بالا را فراهم آورده است. به عنوان مثال استفاده از ادوات ابرسانای دمای بالا در سیستم BTS شبکه موبایل باعث کاهش قابل ملاحظه 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 ابرسانا در BTS شبکه های تلفن همراه استفاده می‌شود، 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 درین 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.

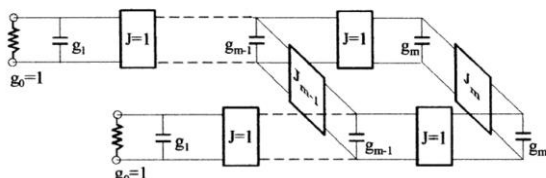
با توجه به مزیتها و کاربردهای منحصر به فردی که فیلترهای ابرسانا و به طور کلی تکنولوژی ابرسانایی مایکروویو می‌تواند داشته باشد، برای



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 پایین گذر 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 Y ها دو مشدد به سه صورت مختلف می توانند 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 ابرسانای 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:

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 شبه بیضوی 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 چبی شف 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 می شود. پاسخ فرکانسی شبه بیضوی شامل دو صفر انتقال محدود در دو لبه باند گذر می باشد (مطابق شکل (۲)). برای تحقق دو صفر انتقال محدود می بایست 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 پایین گذر اولیه این نوع پاسخ فرکانسی در شکل (۳) نشان داده شده است. با توجه به مدار معادل می بایست بین مشددهای غیرمتوالی $m-1$ و $m+1$ تزویج مخالف ایجاد کرد که ساختار مشدد طراحی شده این خاصیت را نیز می تواند برآورده کند. مقادیر عناصر فیلتر پایین گذر اولیه چهار قطبی شبه بیضوی با بیشترین گزینش (صفرهای انتقال تا حد امکان نزدیک به لبه های باند عبور) با استفاده از جدولهای مرجع [7] به صورت زیر می باشد:

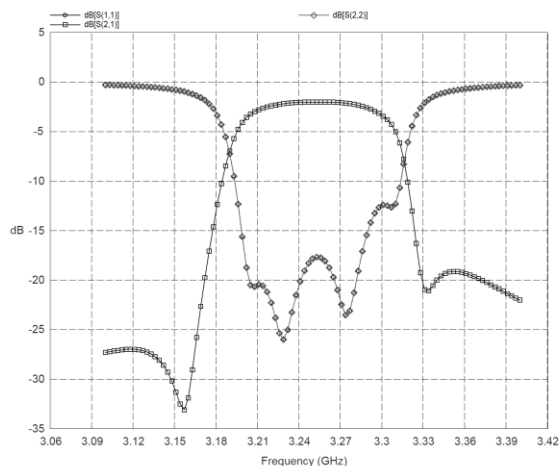
$$\begin{aligned} g_1 &= 0.95974 \\ g_2 &= 1.42192 \\ J_1 &= -0.21083 \\ J_2 &= 1.11769 \end{aligned} \quad (1)$$

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

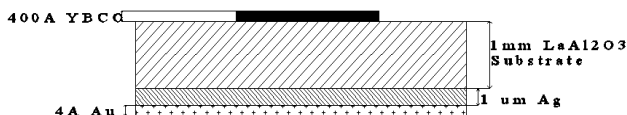
$$\begin{aligned} Q_{ei} &= Q_{eo} = \frac{g_1}{FBW} \\ M_{i,i+1} &= M_{n-i,n-i+1} = \frac{FBW}{\sqrt{g_i g_{i+1}}} \quad \text{for } i=1 \text{ to } m-1 \\ M_{m,m+1} &= \frac{FBW \cdot J_m}{g_m} \\ M_{m-1,m+2} &= \frac{FBW \cdot J_{m-1}}{g_{m-1}} \end{aligned} \quad (2)$$

به این ترتیب ضرایب تزویج و ضریب کیفیت برای فیلتر میان گذر ۴ قطبی با پهنای باند ۳٪ ($FBW=0.03$) با توجه به روابط ۲ به دست می آید:

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



شکل (۶): پاسخ فرکانسی حاصل از شبیه‌سازی فیلتر از جنس مس روی زیر لایه از جنس LaAlO_3 به ضخامت 1mm



شکل (۷): برش از سطح مقطع فیلتر

شده توسط سیستم "Puls Laser Deposition" بر روی زیر لایه LaAlO_3 به ابعاد $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 1\text{mm}$ در مرکز تحقیقات یولیش آلمان ساخته شده است. YBCO فقط در یک طرف زیر لایه نشانی شده است و بنابراین برای ایجاد صفحه زمین در طرف دیگر زیر لایه 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 میکرون 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:

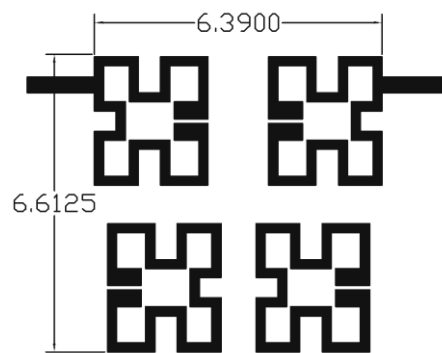
- ۱- انطباق ضریب انبساط جعبه و زیر لایه فیلتر
- ۲- مقاومت الکتریکی مناسب
- ۳- مقاوم بودن در برابر اکسید شدن

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 200 درجه سانتیگراد کاهش یابد. لذا میزان انبساط و انقباض در این محدوده دمایی وسیع بسیار زیاد خواهد بود. با توجه به اینکه

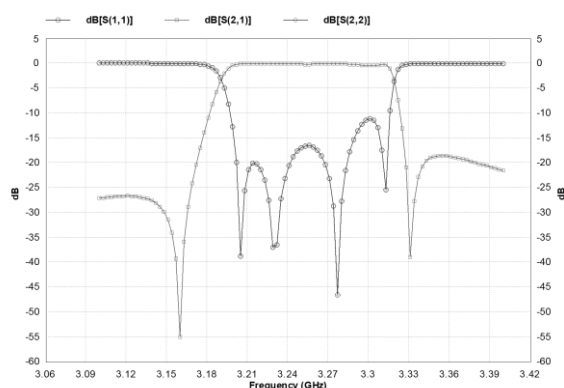
$$\begin{aligned} D_{12} &= 0.8\text{mm} \\ D_{23} &= 0.75\text{mm} \\ D_{14} &= 1.35\text{mm} \\ T &= 0.45\text{mm} \end{aligned} \quad (۴)$$

که D_{nm} فاصله بین مشدهای n ام و m ام 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 گیریه

فیلتر ابررسانا با استفاده از یک فیلم نازک ابررسانای دمای بالا از جنس سرامیک Y1Ba2Cu3O7-x به ضخامت 400 نانومتر، لایه نشانی



شکل (۸): تصویر فیلتر ابررسانا و جعبه آن

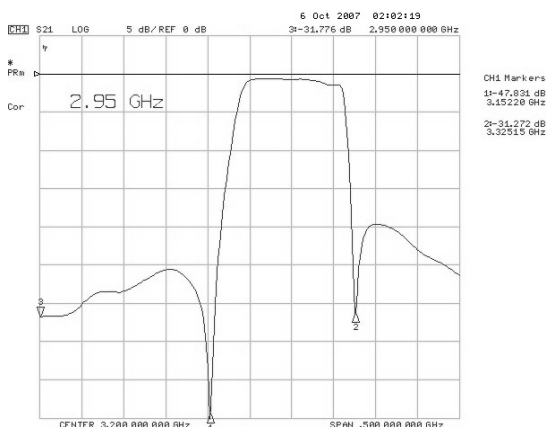
لایه زمین فیلم ابررسانا با استفاده از چسب نقره به کف جعبه چسبانده می‌شود، عدم انطباق ضریب حرارتی بین زیرلایه و جعبه باعث سست شدن اتصال بین لایه زمین زیرلایه و جعبه و ایجاد اثر مخرب در پاسخ فیلتر می‌شود و حتی در صورتی که این عدم انطباق از حدی بیشتر باشد، زیرلایه به طور کلی از جعبه جدا خواهد شد. بنابراین 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 $10 \mu\text{m.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ می‌باشد. از بین فلزات در دسترس تیتانیوم با ضریب انبساط $8.6 \mu\text{m.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ دارای بهترین انطباق ضریب انبساط با LaAl_2O_3 می‌باشد. نهایتاً 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.



شکل (۹): سیستم اندازه گیری مشخصات فیلتر ابررسانا

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 $3\text{cm} \times 1.8\text{cm} \times 1.2\text{cm}$ می‌باشد.

برای اندازه گیری پارامترهای S فیلتر از یک تحلیل‌گر شبکه مدل Agilent 8722ES استفاده شده و فیلتر درون نیتروژن مایع یعنی دمای 77°C درجه کلونین قرار داده شد. در شکل (۹) سیستم اندازه‌گیری و تجهیزات سرمایشی مورد استفاده نشان داده شده است. نتیجه اندازه‌گیری 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.



شکل (۱۰): پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری شده فیلتر

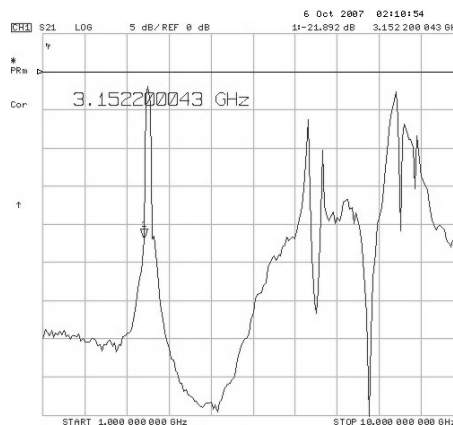
در شکل (۱۲) منحنیهای اندازه‌گیری و شبیه‌سازی مربوط به پاسخ فیلتر در یک شکل رسم شود که بتوان داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی را مقایسه کرد. همانطور که مشاهده می‌کنید علیرغم آنکه نتایج آزمایشگاهی بسیار خوبی به دست آمده، اندکی اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. فرکانس مرکزی و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

قدردانی و تشکر

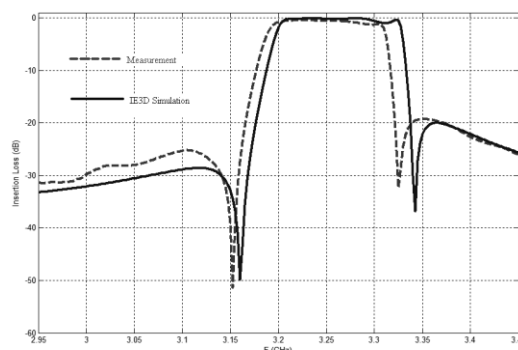
بدین وسیله از مرکز تحقیقات مخابرات ایران که قسمتی از حمایت مالی این پروژه را عهده دار شد و همچنین مهندس فؤاد اروانی که در مراحل ساخت مشارکت داشتند قدردانی به عمل می‌آید.

مراجع

- [1] Lancaster, M. J., Huang, F., Avenhaus, A. B. P., Hong, J.H., Hung, D., "Miniature Superconducting Filters", IEEE Trans. Microw. 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



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 ظاهراً 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 هم‌گزینه 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.