

تطبیق امپدانس خط مایکرواستریپ با استفاده از پدیده‌ی تونلینگ توسط فرا ماده با گذرده‌ی الکتریکی نزدیک به صفر

سید صالح موسوی خالقی^۱، دکتر غلامرضا مرادی^۲ و دکتر رضا صراف شیرازی^۳

۱ کارشناسی ارشد مخابرات-میدان، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ss_moosavy@aut.ac.ir

۲ عضو هیئت علمی (دانشیار) دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳ عضو هیئت علمی (دانشیار) دانشگاه صنعتی امیرکبیر

تاریخ دریافت: ۹۵/۲/۵ تاریخ پذیرش: ۹۵/۵/۲۰

چکیده

در این مقاله روشی نوین برای تطبیق امپدانس خطوط مایکرواستریپ با استفاده از پدیده‌ی تونلینگ انرژی الکترومغناطیسی توسط فرا ماده ENZ ارائه شده است. در این روش ابعاد الکتریکی تطبیق گر امپدانس با استفاده از خاصیت هم‌فاز بودن موج در تمام محیط ENZ، نسبت به تطبیق گرهای دیگر مانند مبدل ربع طول موج، بسیار کوچک‌تر می‌شود. در این روش محدودیت پهنای باند از محدودیت پهنای باند ENZ ناشی می‌شود. در این مقاله فرا ماده ENZ با استفاده از موج بر مستطیلی که در مد TE_{10} کار می‌کند، پیاده‌سازی شده است. پهنای باند روش پیشنهادی بین ۸٪ الی ۱۵٪ حول فرکانس مرکزی خواهد بود. بر اساس روش پیشنهادی تطبیق امپدانس در خط مایکرواستریپ با امپدانس ۱۰۰ اهم طراحی و شبیه‌سازی شده است.

کلیدواژه

تطبیق امپدانس، خطوط مایکرواستریپ، پدیده‌ی تونلینگ، فرا ماده ENZ

مقدمه

پرشده است، شرح داده شده است. مرجع [12] با قرار دادن ذرات غیر مغناطیسی در درون فرا ماده‌ی ENZ توانسته است ضریب نفوذپذیری فرا ماده‌ی ENZ را کنترل کرده و آن را به فضای آزاد تطبیق نماید و یک EMNZ^۳ بسازد. در [13] یک مدار جدید برای تونلینگ ENZ با استفاده از کوپلینگ مایکرواستریپ ارائه شده است. مرجع [10] با استفاده از روشی که در [14] برای پیاده‌سازی پدیده‌ی تونلینگ انرژی الکترومغناطیسی با استفاده از پروب تحریک ارائه شده است، توانسته است پروب مایکرواستریپی تولید کند که تغییرات کم ضریب دی‌الکتریک مواد را اندازه‌گیری کند. اخیراً نیز نقش ENZ و MNZ در تولید ادوات مداری (سلف و خازن) برای شبکه‌های مداری متاترونیک^۴ در فرکانس نوری بررسی شده است [15].

کاربردهای بالا تنها بخش کوچکی از کاربردهای وسیع فرا ماده ENZ بود. این مقاله سعی بر آن دارد تا کاربرد دیگری را برای این دسته از فرا مواد بیان کند. در این مقاله روش جدید تطبیق امپدانس بین دو خط مایکرواستریپ با استفاده از پدیده‌ی تونلینگ شرح داده شده و مثال‌هایی از آن برای خطوط مایکرواستریپ بیان می‌شود.

فرا مواد^۱ ساختارهایی مصنوعی هستند که به دلیل خواص و کاربردهای متنوع در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. فرا مواد اشاره به موادی دارد که به صورت طبیعی موجود نیستند و می‌بایست به صورت مصنوعی ساخته شوند. برای ساختن یک ماده با خواص الکترومغناطیسی مورد نظر، نیاز به تولید اتم‌هایی در مرتبه‌ی $\frac{\lambda}{10}$ و یا کمتر از آن در فرکانس کاری داریم.

در سال ۲۰۰۶ دکتر انقضا و همکارش موفق به بررسی پدیده تونلینگ در دسته‌ای از فرا مواد به نام ENZ^۲ شدند [1]. بررسی این پدیده کاربردهای زیادی را برای این دسته از فرا مواد به وجود آورد [2]. کاربردهای این دسته از فرا مواد در حوزه‌ی شکل‌دهی پرتوی آنتن‌ها [3] و جهت‌دار کردن آن‌ها [4]، [5]، [6] و طراحی خطوط تأخیر و همچنین کاربرد پدیده‌ی تونلینگ در تطبیق موج بر مستطیلی به کابل هم‌محور [7] و خم‌های ناگهانی در موج‌برها [8]، [9] و همچنین ساخت حسگرها برای تعیین ضریب دی‌الکتریک مواد [10]، [11] می‌باشد.

در [8] به صورت تئوری، تأثیر پدیده‌ی تزویج شدید و فشرده شدن انرژی موج و همچنین محدود شدن موج در کانال‌های بسیار باریک که با استفاده از فرا ماده با ضریب گذرده‌ی نزدیک به صفر

3 Epsilon-Mue near zero

4 Metatronic

1 Metamatrical

2 Epsilon near zero : $-1 < \epsilon_r < 1$

به دهانه‌ی ثانویه‌ی کانال برسد [1]. همانند اتفاقی که برای یک سیگنال که در فرکانس پایین و یا DC در یک سیم ارسال می‌شود، خم‌ها و شکست‌های سیم اثری روی سیگنال ندارند. خاصیت دیگر قابل توجه در فرا ماده‌ی ENZ امپدانس ذاتی بالای آن می‌باشد ($\eta = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \approx \infty$) که به‌طور مشابه این مقدار به بی‌نهایت مطلق نخواهد رسید اما مقدار آن زیاد می‌باشد. در این دسته از فرا مواد شرایط مرزی که برای یک ماده‌ی ENZ حاکم است، درست برعکس یک هادی کامل می‌باشد. بدان معنی که، بر روی یک هادی کامل میدان الکتریکی مماسی صفر می‌شود و فقط مؤلفه‌ی عمودی داریم اما در فرا ماده ENZ مؤلفه‌ی میدان عمود صفر می‌باشد و فقط میدان مماسی در روی مرز داریم [16].

ساختار تطبیق گر امپدانس

شماتیک مفهومی

در شکل شماتیک مفهومی ساختار تطبیق گر امپدانس با استفاده از فرا ماده ENZ نمایش داده شده است. در این شکل دو خط مایکرواستریپ با عرض‌های متفاوت W_1 و W_2 (امپدانس‌های متفاوت) بر روی یک زیر لایه قرار دارند و یک کانال ENZ در مرز بین این دو خط مایکرواستریپ همانند شکل ایجاد شده است. ارتفاع کل زیر لایه‌ها h و ضریب دی‌الکتریک آن ϵ_r می‌باشد. ارتفاع کانال با استفاده از یک دیوار هادی کامل که از صفحه‌ی زمین به سمت بالا کشیده شده است به مقدار a_{ch} کاهش یافته است و داخل کانال از فرا ماده ENZ پر شده است. در [1] و [8] ضریب بازتاب موج کانال ENZ، در موج‌بر دو صفحه موازی به‌صورت زیر به‌دست آمده است:

$$p = \frac{jk_0\mu_{ch}A}{2h-jk_0\mu_{ch}A} \quad (3)$$

که در رابطه‌ی بالا k_0 ثابت انتشار موج در فضای آزاد و μ_{ch} ضریب نفوذپذیری مغناطیسی کانال و A سطح مقطع کانال می‌باشد. اگر سطح مقطع کانال نسبت به ارتفاع زیر لایه خیلی کوچک باشد پدیده‌ی تونلینگ انرژی الکترومغناطیسی رخ خواهد داد:

بر اساس تئوری ماکروویو، روش‌هایی شناخته شده برای تطبیق امپدانس دو خط مایکرواستریپ وجود دارد، که عبارت‌اند از:

(۱) استفاده از مبدل امپدانس $\frac{\lambda}{4}$ (۲) مبدل‌های تک‌بخشی یا چندبخشی (۳) استفاده از خطوط نواری (نوار مثلثی و نوار نمایی). ابعاد الکتریکی تطبیق گرهای اشاره شده حداقل برابر ربع طول موج می‌باشد. این روش‌ها عموماً رزونانسی بوده و برای افزایش پهنای باند باید از مبدل‌های چندبخشی استفاده نمود. مزیت روش توضیح داده شده در این مقاله ابتدا کوچک کردن ابعاد الکتریکی تطبیق گر امپدانس است و نیز سهولت پیاده‌سازی می‌باشد. اگرچه پهنای باند ساختار پیشنهادی برای پیاده‌سازی فرا ماده ENZ در این مقاله محدود می‌باشد، اما شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که در صورت استفاده از ساختارهای جایگزین ENZ با پهنای باند بیشتر، می‌توان پهنای باند تطبیق^۵ را افزایش داد.

در این مقاله در بخش دوم فرا ماده ENZ، ویژگی‌های آن و پدیده‌هایی که در آن رخ می‌دهد شرح داده شده و روش‌های پیاده‌سازی آن در فرکانس‌های ماکروویو بحث می‌شود. در بخش سوم روند طراحی تطبیق گر امپدانس و روابط آن بیان شده و تأثیر پارامترهای مختلف ساختار بر تطبیق امپدانس بررسی می‌شود. در بخش آخر، یک نمونه از ساختار ارائه شده برای تطبیق امپدانس خط مایکرواستریپ طراحی شده و نتایج شبیه‌سازی آن با استفاده از نرم‌افزار CST آورده شده است.

فرا ماده ENZ

ENZ دسته‌ای از فرا مواد است که در آن $\epsilon \rightarrow 0$ می‌باشد. البته در این مقاله معیار آن به‌صورت $(-1 < \epsilon_r < 1)$ می‌باشد. یکی از خواص جالب توجه در مورد فرا ماده ENZ این است که در فضای بی‌نهایتی از ENZ سرعت فاز موج v_p بی‌نهایت می‌باشد:

$$v_p = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \approx \infty \quad (1)$$

با توجه به این موضوع که هیچ‌گاه از یک فضای ENZ بی‌نهایت استفاده نمی‌شود و همچنین همه‌ی مواد دارای تلف هستند، از این رو سرعت فاز در این دسته از فرا مواد مقدار بزرگی خواهد بود ولی به بی‌نهایت مطلق نخواهد رسید. به همین ترتیب طول موج، موج هدایت شده λ_g نیز در این دسته از فرا مواد به بی‌نهایت میل می‌کند.

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \approx \infty \quad (2)$$

این زیاد بودن طول موج در فرا ماده ENZ باعث شده است که موج هدایت شده در داخل آن تحت تأثیر شکست‌ها و خم‌های ناگهانی که در کانال ENZ رخ می‌دهد، قرار نگیرد و با توجه به $\beta_g = \frac{2\pi}{\lambda_g} \approx 0$ موج به‌صورت هم‌فاز از دهانه‌ی اول کانال ENZ

۵ معیار تطبیق امپدانس S22 & S11 < -10dB می‌باشد.

که در رابطه‌ی بالا ϵ_{rch} ، ضریب دی‌الکتریک موج‌بر مستطیلی است و k_0 ثابت انتشار و c_0 سرعت نور در فضای آزاد و W_{ch} طول موج‌بر مستطیلی می‌باشد. با قرار دادن $\epsilon_{eff} = 0$ می‌توان ENZ را در فرکانس f_0 پیاده‌سازی کرد. در صورت استفاده از محیط سیمی مدل درود برقرار بوده و رابطه‌ی ضریب دی‌الکتریک مؤثر این محیط به صورت زیر می‌باشد [17]:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + j\Gamma\omega}\right) \quad (7)$$

که در این رابطه ϵ_0 ضریب گذردهی فضای آزاد و ω_p فرکانس پلاسما و Γ تلفات (فرکانس برخورد) می‌باشد. در اینجا نیز با قرار دادن $\epsilon(\omega)$ می‌توان به ENZ دست‌یافت. البته استفاده از روش دوم به دلیل وجود تلفات از میزان تطبیق کمی می‌کاهد. در بخش بعد با استفاده از روابط فوق یک نمونه تطبیق گر امپدانس طراحی شده است و نیز تأثیر پارامترهای مختلف کانال بر تطبیق امپدانس مشاهده می‌شود.

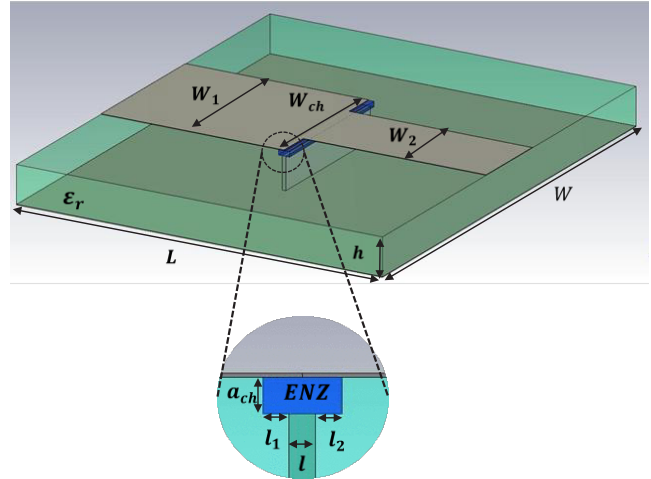
تأثیر پارامترهای مختلف کانال بر تطبیق امپدانس

برای بررسی تأثیر هر یک از پارامترهای کانال در تطبیق امپدانس ابعاد ساختار یک نمونه تطبیق گر امپدانس به‌عنوان مثال در جدول شماره ۱ آورده شده است تا تأثیر پارامترهای مختلف کانال بر تطبیق امپدانس مشاهده شود. در این جدول ارتفاع زیر لایه به چند دلیل بزرگ در نظر گرفته شده است در ابتدا اینکه بتوان تأثیر تغییر W_2 را به‌خوبی مشاهده نمود و همچنین برای ایجاد تونلینگ باید ارتفاع کانال a_{ch} چندین برابر کوچک‌تر از ارتفاع کل زیر لایه h باشد (مرجع [8] این مقدار را ۱۰ در نظر گرفته است و مرجع [13] این مقدار را حداکثر ۸ در نظر گرفته است).

جدول ۱. ابعاد ساختار یک نمونه تطبیق گر امپدانس

*منظور از ۵۰ اهم، امپدانس مشخصه خط در فرکانس طراحی می‌باشد.

پارامتر	مقدار پارامتر	پارامتر	مقدار پارامتر
W	ϵh	a_{ch}	۰.۵۰۸ mm
L	δh	l	۰.۱ h
W_1	$50 \Omega^*$	l_1	۰.۱ h
W_2	100Ω	l_2	۰.۱ h
h	۳.۶۸ mm	ϵ_r	۲.۳۳
		ϵ_{rch}	۵.۴



شکل ۱. شماتیک مفهومی تطبیق گر امپدانس با فرا ماده ENZ

$$A = a_{ch} * (l + l_1 + l_2) \ll h \Rightarrow p \approx 0 \quad (4)$$

قسمت‌های l_1 و l_2 کانال، برای تطبیق امپدانس بین موج‌بر و کانال ENZ می‌باشند زیرا همان‌طور که در بخش قبل ذکر شد امپدانس موج در محیط فرا ماده‌ی ENZ مقدار زیادی است و این اختلاف امپدانس را بخش‌های l_1 و l_2 جبران می‌کنند [8]. در این مرجع با استفاده از این نکته توانسته است در یک خط میکرواستریپ پدیده‌ی تونلینگ را به وجود آورد در این مقاله نیز از این نکته استفاده شده است.

روابط طراحی

برای طراحی تطبیق گر امپدانس با استفاده از فرا ماده ENZ به سه نکته باید توجه نمود:

۱) طراحی باید به‌گونه‌ای باشد که فرکانس رزونانس پلاسما کانال ENZ به‌دوراز فرکانس‌های فابری پروت ساختاری قرار گیرد این کار با انتخاب طول مناسب کانال $l < \frac{\lambda_p}{4}$ به دست می‌آید، طول موج فرکانس پلاسما انتخابی برای تطبیق امپدانس می‌باشد.

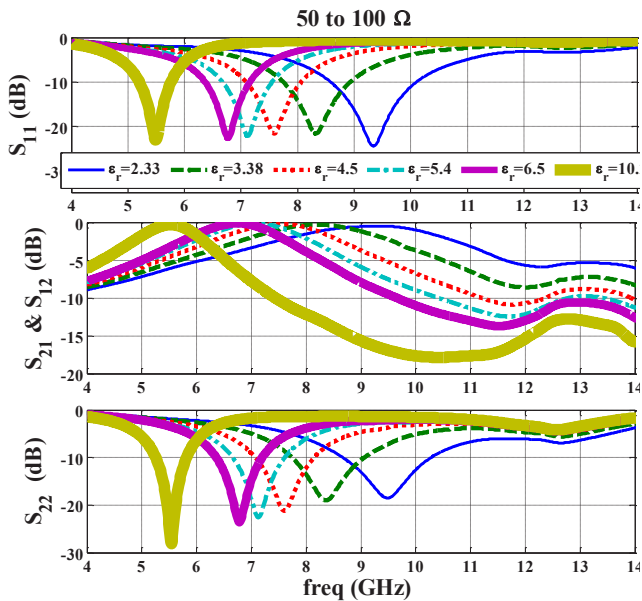
۲) برای پیاده‌سازی ENZ در فرکانس‌های ماکروویو معمولاً از دو روش، موج‌بر مستطیلی در مد TE_{10} و محیط سیمی استفاده می‌شود.

در صورت استفاده از موج‌بر مستطیلی باید دقت نمود که طول موج‌بر مستطیلی W_{ch} که در شکل ۱ برابر عرض خط ۵۰ اهم در نظر گرفته شده است نباید بیش از ۱.۵ برابر عرض خط بزرگ‌تر باشد تا از میزان عبور کاسته نشود. رابطه‌ی ضریب دی‌الکتریک مؤثر موج‌بر مستطیلی به صورت زیر می‌باشد [9]:

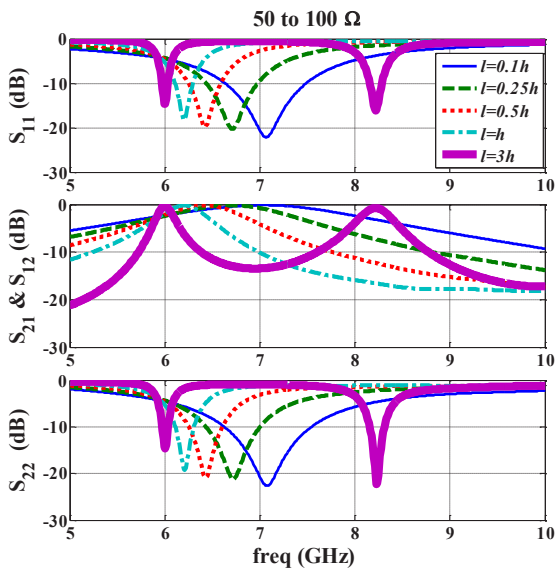
$$\epsilon_{eff} = \epsilon_{rch} - \left(\frac{\pi}{k_0 W_{ch}}\right)^2 \quad (5)$$

$$f_0 = \frac{c_0}{2W_{ch}\sqrt{\epsilon_{rch}}} \quad (6)$$

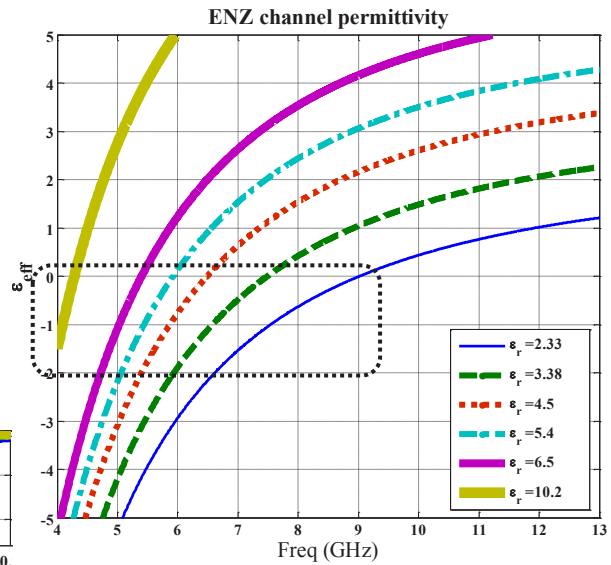
نشان داده شده است. شکل برای تطبیق امپدانس ۵۰ به ۱۰۰ اهم می‌باشد. مشاهده می‌شود که برای $l \geq h$ فرکانس رزونانس از رابطه‌ی (۵) تبعیت می‌کند البته مقداری شیف‌ت رزونانسی به فرکانس بالا مشاهده می‌شود که دلیل این امر در قسمت قبل ذکر شد. در نمودار شکل مشاهده می‌شود، با افزایش طول کانال پهنای باند رزونانس کاهش می‌یابد و رزونانس دوم که مربوط به رزونانس ساختاری کانال است (رزونانس فابری پروت)، به رزونانس اول نزدیک شده است.



شکل ۲. تأثیر تغییر ضریب دی‌الکتریک کانال ϵ_{rch} برای تغییر فرکانس رزونانس برای تطبیق امپدانس ۵۰ به ۱۰۰ اهم



شکل ۳. تأثیر تغییر طول کانال برای تطبیق امپدانس خط ۵۰ به ۱۰۰ اهم



شکل ۴. ضریب دی‌الکتریک مؤثر کانال ENZ برای ابعاد داده شده در جدول (۱)

در شکل مقدار ضریب دی‌الکتریک مؤثر کانال با ابعاد داده شده در جدول (۱) و ضرایب دی‌الکتریک مختلف برای کانال نمایش داده شده است. برای مثال همان‌طور که نشان داده شده است برای ضریب دی‌الکتریک ۵.۴ فرکانس پلاسما در حوالی ۶ GHz می‌باشد.

در شکل‌های ۳-۶ نتایج به دست آمده برای حالتی است که در سمت خط ۱۰۰ اهم پورت تحریک به بار ۱۰۰ اهم و همچنین خط ۵۰ اهم هم به بار ۵۰ اهم تطبیق شده باشد. با این عمل تأثیر تلفات عدم تطبیق و یا تلفات تشعشعی که ناشی از کانکتور SMA می‌باشد حذف می‌شود و تلفات عدم تطبیق و تشعشع خود تطبیق‌گر بررسی می‌شود.

در شکل مقادارهای ۲.۳۳ و ۳.۳۸ و ۴.۵ و ۵.۴ و ۶.۵ و ۱۰.۲ برای ضرایب دی‌الکتریک کانال ϵ_{rch} انتخاب شده است. شکل برای تطبیق امپدانس ۵۰ به ۱۰۰ اهم می‌باشد. مشاهده می‌شود که طبق رابطه‌ی (۵) با تغییر ϵ_{rch} فرکانس قطع مد TE_{10} موج‌بر مستطیلی که همان فرکانس پلاسما ENZ است، تغییر می‌کند که اندکی شیف‌ت فرکانسی دارد برای مثال برای $\epsilon_{rch} = 5.4$ فرکانس پلاسما تقریباً ۶ GHz می‌باشد اما همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود فرکانس رزونانس در ۷.۱ GHz رخ داده است یعنی کمی به فرکانس‌های بالاتر شیف‌ت داشته است این به دلیل خازنی است که به خاطر عدم تطبیق ضریب دی‌الکتریک زیر لایه و کانال به وجود می‌آید. ضریب دی‌الکتریک زیر لایه ۲.۳۳ می‌باشد اگر به نمودار شکل و شکل برای ضریب دی‌الکتریک ۲.۳۳ توجه شود، مقدار این شیف‌ت به صفر میل خواهد کرد.

شکل تأثیر طول کانال l را نمایش می‌دهند. در این اشکال منحنی پارامترهای پراکندگی برای ۵ حالت مختلف یعنی زمانی که طول کانال ۰.۱ و ۰.۲۵ و ۰.۵ و ۱ و ۳ برابر ارتفاع زیر لایه h باشد،

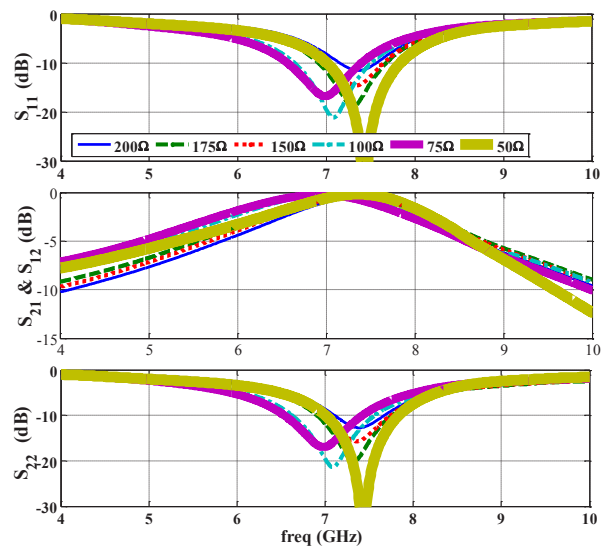
در شکل تأثیر تغییر عرض کانال a_{ch} بر روی تطبیق امپدانس مشاهده می‌شود. این نمودار برای تطبیق امپدانس ۵۰ به ۱۰۰ اهم رسم شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش عرض کانال، از ضریب کیفیت رزونانس کاسته می‌شود و باند عبور پهن‌تر شده است. همان‌طور که در قبل ذکر شد چون ارتفاع کانال زیاد می‌شود دیگر به دلیل شرط $a_{ch} \ll h$ پدیده‌ی تونلینگ نخواهیم داشت. با افزایش a_{ch} ، با توجه به فرمول (۳) چون در این حالت l_1 و l_2 و l کوچک انتخاب شده‌اند باز هم عبور خواهیم داشت اما با افزایش l دیگر از میزان عبور کاسته می‌شود و به حالت عادی خود بازمی‌گردد.

تحقق ساختار قابل پیاده‌سازی

به‌منظور تحقق ساختار قابل پیاده‌سازی تئوری مورد بررسی در بخش قبل، ساختار ارائه‌شده در شکل پیشنهاد شده است. این ساختار بر اساس روش موج‌بری، طراحی و پیاده‌سازی شده است. این ساختار از دولایه تشکیل شده است که دقیقاً روی یکدیگر قرار گرفته‌اند. ضریب دی‌الکتریک لایه‌ی بالایی ϵ_{r2} و ضریب دی‌الکتریک زیر لایه‌ی پایینی ϵ_{rsub} می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده است، جنس دی‌الکتریک کانال نیز از جنس زیر لایه‌ی بالایی است البته می‌توان جنس این دولایه را نیز یکسان انتخاب نمود. همان‌طور که در بخش قبل ذکر شد چون باید ارتفاع لایه‌ی دوم نسبت به کل ارتفاع زیر لایه کوچک است و همچنین اختلاف ضرایب دی‌الکتریک زیاد نیست بنا بر رابطه‌ی که در مرجع [18] برای ضریب دی‌الکتریک مؤثر خطوط میکرواستریپ چندلایه آورده است می‌توان بیان نمود که ضریب دی‌الکتریک مؤثر کل با ضریب دی‌الکتریک مؤثر حالتی که لایه‌ی بالایی نباشد، تقریباً یکسان است. در این حالت برای محاسبه‌ی امپدانس مشخصه‌ی خط میکرواستریپ از نرم‌افزار شبیه‌ساز CST که میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را به‌صورت تمام موج در ساختار محاسبه می‌کند، استفاده شده است. البته می‌توان با استفاده از رابطه‌ی که در مرجع [18] برای ضریب دی‌الکتریک مؤثر خط میکرواستریپ چندلایه آورده شده است، ضریب دی‌الکتریک مؤثر را محاسبه نموده و سپس با استفاده از آن به محاسبه‌ی امپدانس مشخصه پرداخت.

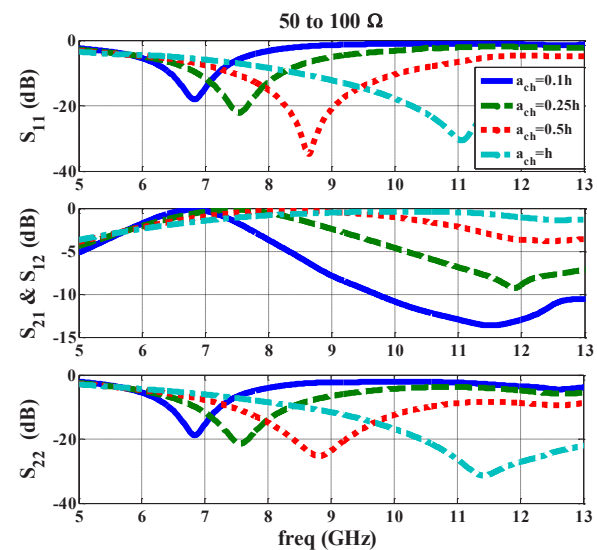
در این ساختار برای راحتی ساخت در فرکانس‌های بالا به‌جای استفاده از دیوار هادی کامل از ساختار SIW [19] که برای فرکانس مرکزی تطبیق امپدانس طراحی شده، استفاده شده است. به‌منظور پیاده‌سازی دو دیوار کناری موج‌بر مستطیلی که حکم ENZ را دارد نیز از دو عدد از via با همان شعاع SIW استفاده شده است. ابعاد نمونه‌ی از تطبیق گر امپدانس با استفاده از فراماده ENZ در جدول (۲) آمده است. ضخامت هادی‌های استفاده‌شده در تمام مقاله ۵۰ میکرومتر می‌باشد. جنس زیر لایه در این نمونه

بنابراین برای هدف تطبیق امپدانس، طول کانال کوچک فرض شده است بنا به دو دلیل (۱) دریافت ماکزیمم پهنای باند، (۲) کوچک کردن تطبیق گر امپدانس.

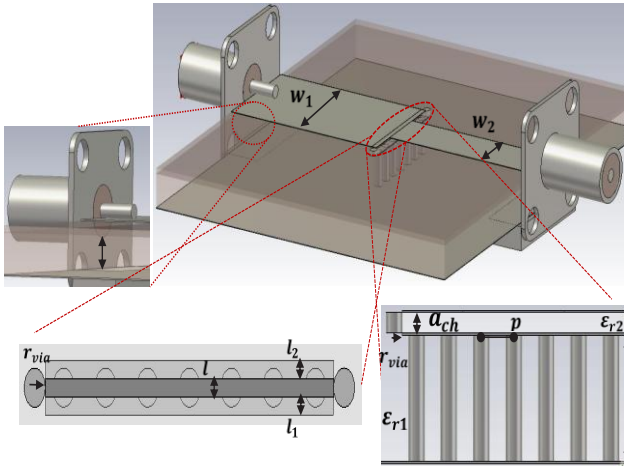


شکل ۵. تأثیر پهنای عرض میکرواستریپ W_2 (امپدانس‌های مختلف) در عناصر پراکندگی

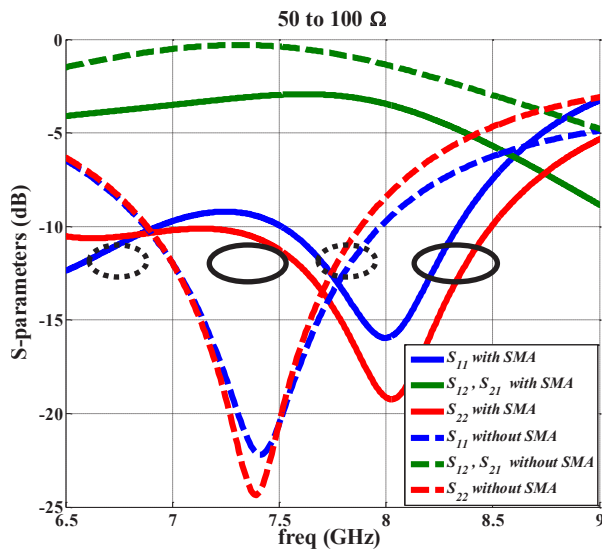
در شکل پهنای خط میکرواستریپ، W_1 ، ۵۰ اهم ثابت نگه‌داشته شده است و پهنای عرض طرف دیگر W_2 تغییر می‌کند. با این کار امپدانس‌های مختلف، در فرکانس پلاسما به خط ۵۰ اهم تطبیق می‌شوند. معیار برای تطبیق امپدانس پارامترها $S_{11} & S_{22} < -10dB$ می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود این معیار در حوالی فرکانس پلاسما برآورده شده است و تطبیق امپدانس صورت گرفته است.



شکل ۶. تأثیر تغییر عرض کانال a_{ch} بر میزان عبور برای تطبیق امپدانس ۵۰ اهم



شکل ۷. ساختار ارائه شده برای پیاده سازی



شکل ۸. نتایج شبیه سازی برای تطبیق امپدانس ۵۰ به ۱۰۰ اهم خط مایکرواستریپ

برای محاسبه پارامترهای پراکندگی در حالت شبیه سازی با SMA برای اینکه تلفات ناشی از عدم تطبیق خط ۱۰۰ اهم به کانکتور SMA ۵۰ اهم از بین برده شود نیاز به تغییر صفحه مرجع فاز و همچنین نرمالیزه کردن امپدانس پورت ها می باشد که در ضمیمه ۱ نحوه ی این عمل آورده شده است. معیار تطبیق امپدانس S_{11} و S_{22} 10dB می باشد که در شکل با یک دایره قرمز رنگ نشان داده شده است. همان طور که شکل مشاهده می شود SMA باعث یک شیفت فرکانسی و همچنین باعث افت در میزان عبور سیگنال می شود.

نتیجه گیری

در این مقاله، روش جدیدی برای تطبیق امپدانس خطوط مایکرواستریپ با استفاده از تونلینگ انرژی الکترومغناطیسی در فراماده ENZ ارائه شد. این روش از هم فاز بودن موج در محیط ENZ

برای لایه ی بالایی Rogers RO4003C می باشد که دارای ضریب دی الکتریک ۳.۳۸ و تانژانت تلفات ۰.۰۰۲۷ در فرکانس مرکزی می باشد و برای لایه ی پایینی نیز از زیر لایه ی Rogers RT5870 استفاده شده است که دارای ضریب دی الکتریک ۲.۳۳ و تانژانت تلفات ۰.۰۰۱۲ در فرکانس مرکزی می باشد.

با توجه به ابعاد داده شده در جدول (۲) ضریب دی الکتریک مؤثر کانال ENZ تقریباً برابر نمودار سبز رنگ شکل ۲ که برای ضریب دی الکتریک ۲.۳۳ رسم شده است، می باشد این نمودار فرکانس پلاسما را در حدود ۷.۵ GHz نمایش می دهد بنابراین تطبیق امپدانس برای این حالت باید در حوالی همین فرکانس رخ دهد. در شکل نتایج شبیه سازی تطبیق گر برای دو حالت با SMA و بدون آن آورده شده است. تا مقایسه ای بین این دو حالت صورت بگیرد. خطوط خط چین نتایج شبیه سازی بدون استفاده از کانکتور SMA را بیان می کند و خطوط، توپر نتایج شبیه سازی با استفاده از کانکتور SMA را نشان می دهد همان طور که مشاهده می شود سطح S_{21} و S_{12} در حالت شبیه سازی با SMA در باند عبور کاهش می یابد و همچنین یک شیفت فرکانسی به فرکانس های بالاتر نیز برای حالت با SMA دیده می شود. دلیل این کاهش سطح S_{12} و S_{21}، تلفات بازگشتی و تشعشعی SMA می باشد زیرا در فرکانس کار ۷.۵ GHz طول زمین کانکتور SMA مضرری از طول موج می باشد و همچنین دلیل شیفت فرکانسی خازنی است که ناشی از هم تراز نبودن دی الکتریک کانکتور SMA و ارتفاع زیر لایه، بر خط مایکرواستریپ، بارگذاری می شود. این هم تراز نبودن کانکتور SMA و ارتفاع زیر لایه در سمت چپ شکل نشان داده شده است.

جدول ۲. ابعاد یک نمونه اندازه گیری شده از تطبیق گر امپدانس

پارامتر	مقدار پارامتر	پارامتر	مقدار پارامتر
W	ϕh	h	$a_{ch} + a_{wg}$
L	δh	l	$0.1 h$
W ₁	50Ω	l ₁	$0.1 h$
W ₂	100Ω	l ₂	$0.1 h$
a _{ch}	۰.۵۰۸ mm	$\epsilon_{r_{sub}}$	Rogers RT5870 =2.33
a _{wg}	۳.۱۷۵ mm	ϵ_{r_2}	Rogers RO4003C =3.38
r _{siw}	۰.۴ mm	p	ϕr_{siw}

Using Epsilon-Near-Zero (ENZ) Tunnel Structure," IEEE Transaction on microwave theory and techniques, vol. 59, no. 7, 2011.

[12] Mário Silveirinha and Nader Engheta, "Design of matched zero-index metamaterials using nonmagnetic inclusions in epsilon-near-zero media," Phys. Rev. B, vol. 75, no. 075119, 2007.

[13] D. V. B. Murthy, A. Corona-Chavez and J. L. Olvera-Cervantes, "A novel epsilon near zero (ENZ) tunneling circuit using microstrip technology for high integrability applications," Progress In Electromagnetics Research C, vol. 15, pp. 65-74, 2010.

[14] O. F. Siddiqui and O. M. Ramahi, "Frequency-selective energy tunneling in wire-loaded narrow waveguide channels," Progress In Electromagnetics Research Letters, vol. 15, pp. 153-161, 2010.

[15] Fereshteh Abbasi and Nader Engheta, "Roles of epsilon-near-zero (ENZ) and mu-near-zero (MNZ) materials in optical metatronic circuit networks," OPTICS EXPRESS, vol. 22, no. 21, 2014.

[16] Francisco J. Rodríguez-Fortuño, Ashkan Vakil, Nader Engheta, "Electric Levitation Using ϵ -Near-Zero Metamaterials," PHYSICAL REVIEW LETTERS, vol. 112, no. 033902, 2014.

[17] Ricardo Marques, Ferran Marti'n, Mario Sorolla, Metamaterials with Negative Parameters Theory, Design, and Microwave Applications, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.

[18] J. Svacina, "Analysis of Multilayer Microstrip Lines by a Conformal Mapping Method," IEEE Trans. Microwave Theory Tech, vol. 40, pp. 769-772, 1992.

[19] X. H. a. A. A. Kishk, Analysis and Design of Substrate Integrated Waveguide Using Efficient 2D Hybrid Method, Morgan & Claypool, 2010.

[20] D. M. Pozar, Microwave Engineering, John Wiley & Sons, 2012.

[21] K. KUROKAWA, "Power Waves and the Scattering Matrix," IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques, pp. 194-202, 1965.

بهره می‌گیرد. در این مقاله برای پیاده‌سازی ENZ از موج‌بر مستطیلی که در مد TE_{10} کار می‌کند استفاده شد. در انتها نیز ساختاری قابل پیاده‌سازی ارائه شده است. از مزایای این روش کاهش اندازه الکتریکی تطبیق گر امپدانس و پیاده‌سازی بسیار آسان و کم‌هزینه آن است. در آخر نیز یک مورد از این تطبیق گر طراحی و شبیه‌سازی شد و مشاهده شد که کانکتور SMA باعث کاهش S_{12} و S_{21} و همچنین یک شیفت فرکانسی برای فرکانس رزونانس می‌شود.

مرجع‌ها

[1] Mário Silveirinha and Nader Engheta, "Tunneling of Electromagnetic Energy through Subwavelength Channels and Bends," no. 97, 2006.

[2] Nader Engheta, Andrea Alù, Mario G. Silveirinha, Alessandro Salandrino, and Jingjing Li, "DNG, SNG, ENZ, and MNZ Metamaterials and Their Potential Applications," in IEEE MELECON, Benalmádena (Málaga), Spain, 2006.

[3] Ebrahim Forati, George W. Hanson, Dan Sievenpiper, "An epsilon-near-zero total-internal-reflection metamaterial antenna," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015.

[4] Andrea Alù, Mário G. Silveirinha, Alessandro Salandrino, and Nader Engheta, "Epsilon-Near-Zero (ENZ) Metamaterials and Electromagnetic Sources Tailoring the Radiation Phase Pattern," Physical Review B, vol. 75, no. 155410, 2007.

[5] S. A. Kyriandou, R. E. Diaz, and N. G. Alexopoulos, "Radiation properties of microstrip elements in a dispersive substrate of permittivity less than unity," IEEE Antennas and Propag, vol. 2, pp. 660-663, 1998.

[6] S. Enoch, G. Tayeb, P. Sabornoux, N. Guerin, and P. Vincent, "A metamaterial for directive emission," Phys. Rev. Lett, vol. 89, p. 213902, 2002.

[7] Andrea Alù, Nader Engheta, "Coaxial-to-Waveguide Matching With ϵ -Near-Zero Ultranarrow Channels and Bends," IEEE Transaction on Antennas and propagations, vol. 58, 2010.

[8] Silveirinha, M. G. and N. Engheta, "Theory of supercoupling, squeezing wave energy, and field confinement in narrow channels and tight bends using epsilon-near zero materials," Phys. Rev. B, vol. 76, pp. 245109-1 {245109-17, 2007.

[9] Andrea Alù, Mário G. Silveirinha, Nader Engheta, "Transmission-Line Analysis of ϵ -Near-Zero (ENZ)-Filled Narrow Channels," Phys. Rev. E, vol. 78, no. 016604, 2008.

[10] R. Ramzan, O. Siddiqui, A. Nauroze and O. Ramahi, "A Microstrip Probe Based On Electromagnetic Energy Tunneling for Extremely Small and Arbitrarily Shaped Dielectric Samples," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015.

[11] Humberto Lobato-Morales, D. V. B. Murthy, Alonso Corona-Chávez, José Luis Olvera-Cervantes, Juan Martínez-Brito, and Luis Gerardo Guerrero-Ojeda, "Permittivity Measurements at Microwave Frequencies

ضمیمه ۱ نحوه استخراج اطلاعات از ساختار قابل

پیاده‌سازی

بنا به اینکه دستگاه‌های اندازه‌گیری با امپدانس ۵۰ اهم کالیبره هستند و خطوط انتقالی که به آن‌ها متصل هستند دارای امپدانس مشخصه‌ی ۵۰ اهم می‌باشند و همچنین برای اندازه‌گیری نیاز به کانکتور SMA با امپدانس ۵۰ اهم می‌باشد یک عدم تطبیق در سمت خط مایکرواستریپی که امپدانس آن ۵۰ اهم نیست، رخ می‌دهد. برای جبران این عدم تطبیق پس از اندازه‌گیری و استخراج نتایج باید یک مرحله شیفت صفحه‌ی مرجع فاز [20] به دلیل طول خود کانکتور SMA داده شود و همچنین یک مرحله نرمالیزاسیون امپدانس [21] به خاطر عدم تطبیق امپدانس خط مایکرواستریپ و کانکتور SMA ۵۰ اهم، بر روی نتایج صورت بگیرد تا نتایج موردنظر دست یابد. میزان شیفت فاز به‌اندازه‌ی طول کانکتور SMA می‌باشد. فرمول شیفت فاز در مرجع [20] می‌باشد و برای نرمالیزاسیون امپدانس می‌توان از رابطه‌ی زیر که در مرجع [21] آورده شده است استفاده نمود:

$$Z = \sqrt{Z_0}(I - S)^{-1}(I + S)\sqrt{Z_0} \quad (1)$$

$$S_{new} = \sqrt{Y_{new}}(Z - Z_{new})(Z + Z_{new})^{-1}\sqrt{Z_{new}} \quad (2)$$

که در روابط بالا Z ماتریس امپدانس برای حالت نرمالیزه نشده و I ماتریس همانی و S ماتریس پراکندگی در حالت نرمالیزه نشده و Z_0 ماتریس قطری امپدانس مشخصه‌ی هر دهانه قبل از نرمالیزاسیون است و Z_{new} و Y_{new} به ترتیب ماتریس قطری امپدانس مشخصه و ماتریس قطری ادmittانس مشخصه بعد از نرمالیزاسیون می‌باشند.