

طراحی ساختار ریز نوار فلزی در حذف مدهای ناخواسته مشدد عایقی بزرگتر از اندازه

زهرا سلطانی^۱، شهرزاد اسدی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، ۲- استادیار، دانشگاه شهید بهشتی

(دریافت: ۹۸/۰۴/۰۱، پذیرش: ۹۸/۰۶/۰۴)

چکیده

برای ساخت نوسان‌سازها با نویز فاز کم، طراحی یک مشدد با ضریب کیفیت زیاد نیاز است. تحریک مدهای مرتبه بالاتر روشی مناسب جهت افزایش ضریب کیفیت است. البته وجود مدهای ناخواسته یک مسئله مهم در تحریک مدهای مرتبه بالاتر است. مدارهای نوسان‌سازها به علت فاصله نزدیک بین مدها، در مد مورد نظر خود نمی‌توانند به درستی نوسان کنند. این مقاله یک روش طراحی از مشدد عایقی ارائه می‌دهد که منجر به بهبود عملکرد در حضور مدهای مزاحم در تحریک مدهای مرتبه بالاتر می‌شود. هدف، کنترل پهنای باند بین بسامد تشدید و بسامدهای ناخواسته به منظور استفاده در نوسان‌سازهای کم نویز است. یک مشدد عایقی ۸ GHz که در مد TE_{228} تحریک شده است، ضریب کیفیتی برابر با ۱۲۴۵۰ دارد که بالاتر از ضریب کیفیت مشدودی است که در مد TE_{018} تحریک شده و ضریب کیفیت آن برابر ۸۱۰۰ است. همچنین بسامد های ناخواسته در ۸/۰۵ GHz و ۸/۳ GHz توسط روش پیشنهاد شده با حداقل تاثیر بر بسامد اصلی تشدید حذف شده است.

کلیدواژه‌ها: مدهای مرتبه بالا، مشدد بزرگتر از اندازه، حذف مد مزاحم

۱. مقدمه

قطبی، با عدد نویز کم و f_c پایین تر مناسب نیستند [۲]. بنابراین، مهم است که روش‌های مختلفی برای کاهش اثر نویز فلیکر مورد مطالعه قرار گیرد. با توجه به رفتار غیرخطی نوسان‌سازها، باندهای کناری نویز فلیکر با توان کل افزایش می‌یابد. برای کاهش نویز فلیکر، یکی از روش‌ها بدون تغییر المان فعال، روش نوسان‌ساز و تقویت‌کننده با گین انتقال (TGA /TGO) است. این روش‌ها، شیوه‌های جایگزین برای کاهش نویز فلیکر است. اساس این روش استفاده از مزیت نویز کم در قطعات بسامد پائینی است که از طریق انتقال بسامدی میسر می‌شود. وجود تاخیر بین دو مخلوط‌کننده عملکرد نویز فاز را مستقل از خلوص طیفی نوسان کننده محلی می‌کند [۳-۴]. نوسان‌سازها با گین انتقالی (TGO) با قرار دادن یک مشدد در حلقه TGA به دست می‌آید. این نوسان‌سازها نسبت به نوسان‌ساز اصلی، نویز فاز بسیار کمتری را خواهد داشت.

علاوه بر این، ضریب کیفیت بارگذاری نشده، Q_u ، یک پارامتر از پیش تعیین شده است که وابسته به ساختار مشدد و روش ساخت آن است. همچنین تزویج تقویت‌کننده به مشدد در حلقه فیدبک برای کمینه کردن نویز فاز یک مسئله مهمی است؛ تزویج کمینه مشدد در [۵] محاسبه شده است. با توجه به این نظریه، مقدار ضریب تلفات مشدد تنظیم شده برای بارگذاری بهینه ۶ dB است. بدین معنی است که تقویت‌کننده باید بهره‌ای بیش از ۶ dB برای تضمین شروع نوسان، تولید کند. همچنین افزایش

نوسان‌سازها به عنوان یک منبع سیگنال پایدار با نویز فاز کم، در سیستم‌های مخابراتی استفاده می‌شوند. عملکرد نوسان‌سازها به پارامترهای مختلفی بستگی دارد که نویز فاز مهمترین آن‌ها است. یک نوسان‌سازها از دو بخش، تقویت‌کننده به عنوان المان فعال و مشدد به عنوان یک المان غیرفعال تشکیل شده است. برای رسیدن به نوسان‌سازها با نویز فاز کم، انتخاب تقویت‌کننده با نویز کم و مشدد با ضریب کیفیت زیاد یک مسئله مهم در بهبود عملکرد نوسان‌ساز است.

معادله لیسون^۲، به عنوان مدل شناخته شده، نویز فاز یک نوسان‌سازها را بر حسب پارامترهای آن توصیف می‌کند. این معادله بستگی به معکوس مربع ضریب کیفیت بارگذاری شده Q_L ، f_c بسامد گوشه نویز فلیکر، عدد نویز تقویت‌کننده F و توان خروجی نوسان‌سازها P_o دارد. برای به حداقل رساندن نویز فاز نوسان‌سازها، این عوامل باید بهینه شوند [۱].

انتخاب یک عنصر فعال با مشخصه نویز کم برای کاهش f_c ضروری است. تقویت‌کننده‌های دو قطبی رایج‌ترین نوع برای طراحی نوسان‌سازها با نویز فاز کم هستند. تقویت‌کننده‌های اثر میدانی کم نویز هستند، اما در مقایسه با تقویت‌کننده‌های دو

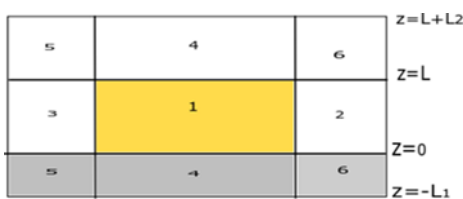
* نویسنده پاسخگو: sh_asadi@sbu.ac.ir

می‌تواند برای بسامد خاصی مورد استفاده قرار گیرد زیرا ساختار مشدد تغییر یافته است. همچنین، در WGM، مدهای ناخواسته با قرار دادن سیم‌های فلزی در بالای دیسک، مهار می‌شوند.

هدف از ایده ارائه شده در این مقاله استفاده از مزیت مدهای مرتبه بالاتر و حذف اثر مدهای نزدیک در طراحی نوسان‌سازها میکروویو است. یک روش طراحی مشدد عایقی برای بهبود عملکرد مدهای ناخواسته در مدهای مرتبه بالاتر پیشنهاد شده است. با استفاده از این روش، مشدد عایقی را می‌توان در بسامد های مختلف با تغییر الگویی که به ساختار آنها اضافه می‌شود، استفاده نمود. اساس این تکنیک، یافتن توزیع میدان‌های الکتریکی مد اصلی و مدهای ناخواسته برای از بین بردن میدان‌های الکتریکی مد ناخواسته است. نکته مهم این است که حذف و یا انتقال بسامد های ناخواسته به خارج از منطقه نوسان با حداقل تاثیر تلفاتی بر مد اصلی صورت پذیرد.

۲. ضریب کیفیت مشدد عایقی مد TE_{nm1}

میدان مماس خارج از سطح یک مشدد همانند میدان مماسی در قسمت داخلی آن سطح است که به تدریج با دور شدن از سطح مقدار آن کاهش می‌یابد. بنابراین، بخشی از مجموع انرژی ذخیره شده در خارج از مشدد وجود دارد، اگر چه این بخشی از انرژی در مدل دوم مرتبه Cohn نادیده گرفته شده است [۱]. برای بهبود دقت، مدل مشدد عایقی توسعه یافته متشکل از شش منطقه، همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، در نظر گرفته شده است.



شکل (۱): مشدد عایقی داخل محفظه.

مولفه‌های میدان مدهای ممکن در موجبر عایقی، با حل معادله برداری هلمهولتز میدان الکتریکی و مغناطیسی در جهت Z در مختصات استوانه‌ای به دست می‌آید.

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + (\omega^2 \epsilon \mu - \frac{1}{r^2}) \psi + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

در منطقه ۱، میدان‌های TE به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$H_{\rho 1} = \frac{\beta a H_0}{p_{nm}} J_n \left(\frac{p_{nm} \rho}{a} \right) \cos n \phi \cos \frac{l \pi z}{L} \quad (2)$$

$$H_{\phi 1} = \frac{-\beta a^2 H_0}{(p_{nm})^2 \rho} J_n \left(\frac{p_{nm} \rho}{a} \right) \sin n \phi \cos \frac{l \pi z}{L} \quad (3)$$

توان خروجی نوسان‌سازها از طریق طراحی حلقه فیدبک مناسب می‌تواند روش دیگری برای بهبود نویز فاز باشد. انتخاب مشدد با ضریب کیفیت بارگذاری شده زیاد موثرترین گام در طراحی نوسان‌سازها با نویز فاز کم است. با توجه به اثر معکوس مربع Q_L در کاهش نویز فاز، بسیاری از تحقیقات در مورد افزایش Q_L انجام شده است، زیرا یک پارامتر اساسی در طراحی مشدد جهت به‌کارگیری در عملکردهای با نویز کم است. تاکنون چندین ساختار و روش پیشنهاد شده است که ضریب کیفیت مشدد عایقی افزایش یابد. مشددهای مد نجواکننده^۱ (WGM)، محفظه‌های بارگذاری شده عایقی هستند که انرژی میدان را به لبه بیرونی یک حلقه که موجب ضریب کیفیت بالاتر است، سوق می‌دهد [۶-۷].

نوع دیگری از مشددها، مشددهای توزیع شده براگ هستند که در مقایسه با مشددهای میکروویو معمول، ضریب کیفیت بالاتری دارند. این مشددها با جایگزینی لایه‌های مختلف هوا و عایق به دست می‌آیند. تغییر ناگهانی ثابت عایق در هر یک از لایه‌های هوا و عایق موجب بازتاب جزئی جریان موج الکترومغناطیسی می‌شود. اگر چند لایه عایق-هوا ترکیب شوند، مقدار زیادی انرژی به قسمت مرکزی حفره بازگردانده می‌شود. این امر موجب کاهش تلفات فلزی دیواره‌های انتهایی و افزایش ضریب کیفیت می‌شود [۸].

یکی دیگر از روش‌های ممکن برای بهبود ضریب کیفیت، تحریک مشدد در مدهای مرتبه بالاتر است. البته این امر باعث می‌شود که ابعاد آنها افزایش یابد، زیرا عدد شاخص‌ها در یک یا دو جهت افزایش می‌یابد. اگر چه بهبود ضریب کیفیت یکی از دلایل اصلی تحریک مدهای مرتبه بالاتر در مشدد عایقی است، کاهش فاصله بسامد تشدید مدها به‌عنوان یکی از معایب باید مورد توجه قرار گیرد. برای جلوگیری از نوسان در مدهای ناخواسته، روش حذف مد باید جهت تضعیف بسامدهای ناخواسته به‌کار گرفته شود. اضافه نمودن روزنه یا حفره به مشدد عایقی جهت تضعیف مدها در نقاطی که میدان‌های الکتریکی متعلق به مدهای مزاحم حداکثرند، مدهای ناخواسته را حذف یا تضعیف می‌کند [۹-۱۰]. نشان داده شده است که ایجاد حفره در مرکز مشدد عایقی باعث بهبود عملکرد مدهای ناخواسته می‌شود [۱۱].

علاوه بر این، ایجاد شکاف در مشدد عایقی، روش دیگری است که باعث می‌شود مدهای ناخواسته تضعیف شوند [۱۲]. همچنین تجزیه و تحلیل چگالی انرژی مشدد عایقی، یک روش جایگزین کارآمد برای مهار مدهای نامطلوب پیشنهاد داده است [۱۳]. اگر چه این روش‌ها کارآمد هستند، ولیکن هر ساختار اصلاح‌شده

¹ Whispering Gallery Mode

به منظور طراحی مشددهای عایقی در بسامد مورد نظر در مدهای مرتبه بالاتر، معادله مشخصه رزونانس در رابطه (۹) جهت یافتن ابعاد مشدد عایقی که در آن n مرتبه تابع بسط باید حل شود. به منظور حل، با توجه به ارتباط بین β_{nm} ، h_{nm} و ρ_{nm} به ازای L مشخص، β_{nm} مشخص شده و رابطه صرفاً تابع ω_{nm} مجهول است. رابطه (۹) بر حسب ω_{nm} در محدوده مورد نظر رسم و محل تلاقی آن با محور افقی مقدار تقریبی ω_{nm} را می‌دهد. مقدار دقیق حول مقدار فوق با روش Bisection به دست می‌آید.

$$\frac{J'_n(\rho_{nm}a)K_n(h_{nm}a)}{\rho_{nm}} + \frac{J_n(\rho_{nm}a)K'_n(h_{nm}a)}{h_{nm}} = 0 \quad (7)$$

۴. روش حذف مدهای ناخواسته

اگرچه مشددهای تحریک شده در مدهای مرتبه بالا، ضریب کیفیت بالاتری دارند، ولیکن حضور بسامد های تشدید ناخواسته محدودیتی در استفاده از آنها در مود اصلی ایجاد می‌کند. فاصله کم بین بسامدهای تشدید باعث می‌شود که نوسانگر به درستی در بسامد دلخواه نوسان نکند و باید یکی از بسامدهای مدهای مجاور پرش کند. دور نگه داشتن بسامد های ناخواسته از بسامد تشدید به منظور ساخت نوسان سازها با نویز فاز کم ضروری است. عملکرد مشدد در بسامد های نامطلوب در مدهای مرتبه بالاتر تحت تاثیر مدهای TM، HEM، و TE قرار می‌گیرد. هدف این بخش حذف بسامد ناخواسته با حداقل تاثیر بر مد مطلوب است. شرایط نوسان در بسامد های ناخواسته نباید برقرار شود.

روش‌های زیادی برای حذف این مدها وجود دارد که در مقدمه به آن‌ها اشاره شد. ایجاد حفره یا شکاف مثالی از این شیوه‌ها هستند. روش‌های موجود از مشدد عایقی تنها در بسامد خاص استفاده می‌کنند، زیرا ساختار برای تشدید این بسامد ایجاد شده و با ایجاد حفره در بسامد های دیگر قابل استفاده نیستند. اساس ساختار پیشنهاد شده در این مقاله بر اساس تعیین توزیع میدان است. برای حذف بسامد ناخواسته، میدان‌های مد مربوطه باید به حداقل برسد. ایجاد تغییر در ساختار مشدد در نقاطی که مد اصلی دارای میدان الکتریکی صفر یا ناچیز است در حالی که مد های دیگر دارای میدان الکتریکی محدود هستند، اساس ساختار پیشنهادی است.

پیدا کردن نقطه حداکثر میدان الکتریکی مربوط به مد اصلی و مد ناخواسته اولین گام در جهت حذف مد است. قرار دادن حلقه فلزی یا روزنه در نقاط متعلق به حداکثر میدان‌های بسامد ناخواسته می‌تواند این بسامد ها را در بهترین حالت حذف و در غیراین صورت تضعیف کند. تراکم انرژی مغناطیسی در مدهای ناخواسته، مقدار کلیه بسامد های تشدید را افزایش می‌دهد. اگر چه، افزایش جزئی در بسامد اصلی وجود خواهد داشت، افزایش

$$E_{\rho 1} = \frac{jk\eta a^2 n H_0}{(P_{nm})^2 \rho} J_n\left(\frac{P_{nm}\rho}{a}\right) \sin n\phi \sin \frac{l\pi z}{L} \quad (4)$$

$$E_{\phi 1} = \frac{jk\eta a H_0}{P_{nm}} J'_n\left(\frac{P_{nm}\rho}{a}\right) \cos n\phi \sin \frac{l\pi z}{L} \quad (5)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$$

در بسامد تشدید، انرژی الکتریکی و مغناطیسی ذخیره شده با هم برابر است، انرژی ذخیره شده کل به صورت زیر خواهد بود:

$$W = 2W_e = \frac{\epsilon_0}{2} \int ((E_\rho)^2 + (E_\phi)^2) dv = \frac{\epsilon k^2 \eta^2 a^2 H_0^2 \pi L}{8P_{nm}^2} \left[1 - \left(\frac{n}{P_{nm}}\right)^2 \right] J_n^2(P_{nm}) \quad (6)$$

و تلفات توان در دیواره ها:

$$P_c = \frac{R_s}{2} \int |H_{tan}|^2 ds = \frac{R_s}{2} \int ((H_\rho)^2 + (H_\phi)^2) ds = \frac{R_s}{2} \pi H_0^2 \left\{ \left(\frac{\beta a^2}{P_{nm}}\right)^2 \left(1 - \frac{n^2}{(P_{nm})^2}\right) J_n^2(P_{nm}) + \left(\frac{\beta a}{h_{nm}}\right)^2 \left(1 + \frac{n^2}{(h_{nm}a)^2}\right) K_n^2(h_{nm}a) \right\} \quad (7)$$

که:

$$h_{nm}^2 = \beta_{nm}^2 - k_0^2$$

$$\rho_{nm}^2 = k_s^2 - \beta_{nm}^2$$

$$k_0^2 = \omega_{nm}^2 \epsilon_0 \mu_0$$

$$k_s^2 = \omega_{nm}^2 \epsilon_0 \mu_0 \epsilon_r'$$

$$\beta_{nm} = \frac{l\pi}{L}$$

بنابراین، ضریب کیفیت محفظه ناشی از تلفات هادی (دیواره‌ها)، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_c = \frac{\omega_0 W}{P_c} = \frac{(\omega_0 \epsilon_0 k^2 \eta^2 a^2)}{4R_s \rho_{nm}^2} \quad (8)$$

$$\frac{\left[1 - \left(\frac{n}{P_{nm}}\right)^2 \right] J_n^2(P_{nm})}{\left\{ \left(\frac{\beta a^2}{P_{nm}}\right)^2 \left(1 - \frac{n^2}{(P_{nm})^2}\right) J_n^2(P_{nm}) + \frac{(\beta a)^2}{h_{nm}^2} \left(1 + \frac{n^2}{(h_{nm}a)^2}\right) K_n^2(h_{nm}a) \right\}}$$







$$Q_c = \frac{(ka)^3 \eta a d}{4R_s (\rho_{nm}a)^2 \left\{ \left(\frac{\beta a^2}{P_{nm}}\right)^2 \left(1 - \frac{n^2}{(P_{nm})^2}\right) J_n^2(P_{nm}) + \frac{(\beta a)^2}{h_{nm}^2} \left(1 + \frac{n^2}{(h_{nm}a)^2}\right) K_n^2(h_{nm}a) \right\}}$$

علاوه بر این، با توجه به تلفات عایقی، توان هدر رفته عایق Q_d که برابر با معکوس تانژانت تلفات است، باید مورد توجه قرار گیرد.

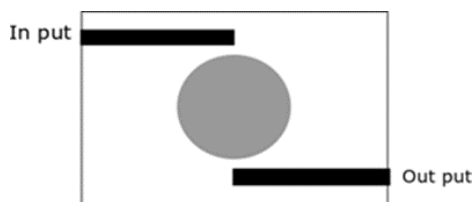
۳. مدهای مرتبه بالا در مشدد عایقی

یک روش دقیق برای تجزیه و تحلیل مدهای مرتبه بالاتر و محاسبه ضریب کیفیت مشددهای عایقی، روش تطبیق مد است [۱۴].

جدول (۲): جدول مدهای مشدد عایقی در بسامد ۳۰ GHz.

مد	شعاع (mm)	ارتفاع (mm)	Q _c	ساختار
TE ₀₁₈	۰/۷۱	۰/۹۲	۲۱۰۰	
TE ₀₂₈	۱/۶۳	۱/۸۵	۲۱۸۵	
HEM ₂₁₈	۱/۵	۰/۹۲	۲۶۲۰	
HEM ₁₂₂	۲/۰۷	۱/۸۵	۲۵۷۵	
HEM ₂₂₈	۲/۵	۱/۸۶	۳۳۰۰	
HEM ₂₃₈	۲/۹	۲/۸	۳۰۳۷	

تجزیه و تحلیل این مشدد نشان می‌دهد که مدهای مختلفی در نزدیکی بسامد ۸ GHz به نام بسامد ناخواسته وجود دارد که باید حذف شود. این بسامدها ۸/۸۰۲ GHz، ۸/۲۷۶ GHz، ۸/۴۳۹ GHz، ۸/۵۶۳ GHz و ۸/۵۶۴ GHz هستند. مشدد عایقی تزویج شده به خطوط مایکروستریپ با پیکربندی‌های مختلف مانند تزویج از انتها^۱ و تزویج به لبه‌ها^۲ می‌توانند برخی از بسامد های ناخواسته را حذف کنند. نشان داده شده است که از طریق اتصال لبه، تلفات داخلی^۳ به‌عنوان یکی از جنبه‌های مهم در طراحی نوسان‌ساز بسیار بهتر از حالت مایکروستریپ‌ها با اتصال از انتها است [۱۴]. شکل (۲) یک مشدد عایقی تزویج شده به لبه را نشان می‌دهد. مشدد توسط یک جداکننده^۴ از جنس عایق در داخل یک محفظه هادی قرار داده شده است. این ساختار با استفاده از خط انتقال مایکروستریپ روی بستر Rogers RO4003C تحلیل شده است. این مواد تلفات عایقی کمی را نشان می‌دهند، لذا آن‌ها را برای کاربردهای بسامد بالا مناسب می‌سازد.



شکل (۲): ساختار مشدد عایقی با تزویج از لبه.

رفتار بسامدی مشدد عایقی با تزویج از لبه تحریک شده در مدهای مرتبه بالاتر توسط شبیه‌ساز HFSS در شکل (۳) نشان داده شده است. تشدید در بسامد های مختلف ناشی از مدهای مرتبه بالا قابل مشاهده است. از آنجایی که گین تقویت کننده







قابل توجه در بسامد مدهای ناخواسته منجر به حذف مدهای ناخواسته از پهنای باند مطلوب می‌شود. با این حال، نه تنها محفظه عایقی، بلکه پارامترهای خطوط مایکروستریپ تزویج شده نیز تأثیر قابل توجهی در طراحی مشدد دارند. شبیه‌سازی ساختار در شبیه‌ساز HFSS روش ساده‌ای برای پیدا کردن مکان و ابعاد روزنه‌ها و حلقه‌های اضافی است. همچنین با قرار دادن بسامد ناخواسته در (۹)، ریشه‌های بسمل و در نتیجه شعاع روزنه‌ها و حلقه‌ها به‌دست می‌آید. بنابراین، نقاط متعلق به میدان‌های حداکثر نزدیک‌ترین مدها به مد اصلی به‌دست می‌آیند.

۵. اصول طراحی DR

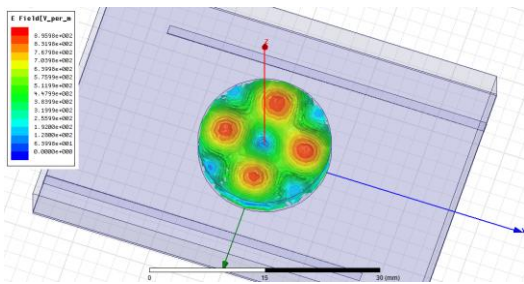
به‌منظور طراحی مشدد عایقی با ضریب کیفیت زیاد، مدهای مختلف با استفاده از رابطه (۹) مورد بررسی قرار می‌گیرد. نمونه‌ای از مشدد از جنس عایق BaZnTaO₃ با ضریب عایقی برابر با $29/5 \pm 1$ استفاده شده است. نتایج حاصل از بررسی مدهای مختلف در دو بسامد تشدید ۸ GHz و ۳۰ GHz از لحاظ ضریب کیفیت و ابعاد در جدول‌های (۱-۲) مقایسه شده است.

علاوه بر افزایش ضریب کیفیت در مدهای مرتبه بالاتر، مزیت دیگر آن، افزایش سایز مشدد است. افزایش سایز همواره محدود کننده نیست و در بسامد های بالا که اندازه مشدد در مود اصلی کوچک است، کارگشاست. مشدد عایقی با شعاع ۹/۶ mm ارتفاع ۳/۲ mm و مد تحریک HEM₂₂₈ به‌عنوان یک مشدد با بسامد تشدید ۸ GHz انتخاب شده است.

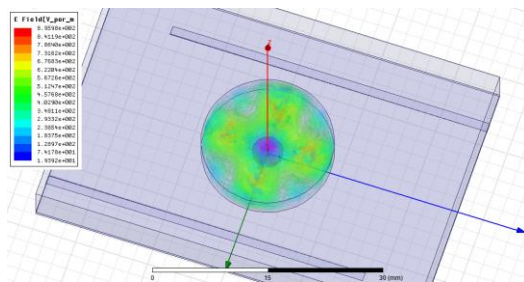
جدول (۱): جدول مدهای مشدد عایقی در بسامد ۸ GHz.

مد	شعاع (mm)	ارتفاع (mm)	Q _c	ساختار
TE ₀₁₈	۲/۷۵	۳/۲	۸۱۰۰	
TE ₀₂₈	۶/۳۲	۳/۲	۸۷۵۰	
HEM ₂₁₈	۵/۸۸	۳/۲	۹۷۲۲	
HEM ₁₂₂	۸/۲۷	۷	۹۷۰۵	
HEM ₂₂₈	۹/۶	۳/۲	۱۲۴۵۰	
HEM ₂₃₈	۱۳/۲۹	۳/۲	۱۱۲۵۰	

- 1 end coupling
- 2 Edge coupling
- 3 insertion loss
- 4 spacer



(ب)



(ج)

ادامه شکل (۴): توزیع میدان الکتریکی مشدد عایقی در فاصله
 (آ) ۸/۰۵ GHz - ۸/۱۰ GHz، (ب) ۸/۱۰ GHz - ۸/۳۰ GHz، (ج) ۸/۳۰ GHz - ۸/۵۰ GHz.

برای تشخیص مرتبه مد بسامد مورد نظر، ابعاد مشدد باید در معادله (۹) جایگذاری شود. ریشه تابع بسل، بسامد تشدید را تعیین می‌کند. با انتخاب نزدیکترین مقدار ریشه بسل به P_{mn} در رابطه (۱۰)، عدد مد مشخص خواهد شد. همین روش برای بسامد های ناخواسته اعمال می‌شود. بنابراین، مد اصلی HEM_{226} و بسامد های ناخواسته TE_{046} و HEM_{136} می‌باشد. به منظور تضعیف بسامد ناخواسته، میدان‌های این مدها باید محدود شود و اثر حداقل بر روی توزیع میدان مد اصلی داشته باشد. محل نقطه حداکثر میدان الکتریکی هر مد باید تعیین شود.

میدان الکتریکی مماسی مد TE_{046} :

$$E_{\phi 1} = \frac{jk\eta a H_0}{P'_{04}} J_0 \left(\frac{P_{04}\rho}{a} \right) \sin \frac{\pi z}{L} \quad (10)$$

$$E_{\rho 1} = 0 \quad (11)$$

میدان الکتریکی مماسی مد HEM_{226} :

$$E_{\rho 1} = \frac{jk\eta a^2 H_0}{(P'_{13})^2 \rho} J_2 \left(\frac{P_{22}\rho}{a} \right) \sin 2\phi \sin \frac{\pi z}{L} \quad (12)$$

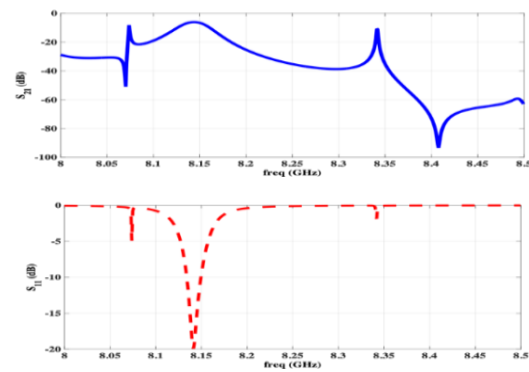
$$E_{\phi 1} = \frac{jk\eta a H_0}{P'_{13}} J_2 \left(\frac{P_{22}\rho}{a} \right) \cos 2\phi \sin \frac{\pi z}{L} \quad (13)$$

میدان الکتریکی مماسی مد HEM_{136} :

$$E_{\rho 1} = \frac{jk\eta a^2 H_0}{(P'_{13})^2 \rho} J_1 \left(\frac{P_{13}\rho}{a} \right) \sin \phi \sin \frac{\pi z}{L} \quad (14)$$

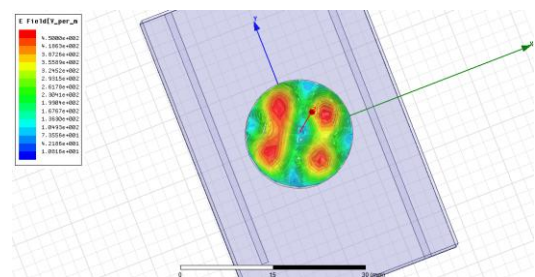
$$E_{\phi 1} = \frac{jk\eta a H_0}{P'_{13}} J_1 \left(\frac{P_{13}\rho}{a} \right) \cos \phi \sin \frac{\pi z}{L} \quad (15)$$

حدود ۱۰ dB است، مدهایی که تلفات داخلی S_{21} آنها کمتر از ۱۵ dB است، نیازی نیست که حذف گردند زیرا شرایط نوسان را برقرار نمی‌سازند. دو بسامد تشدید اضافی در دو طرف بسامد مورد نظر ظاهر می‌شود. شکل (۳) بسامدهای ناخواسته بسامد مورد نظر را نشان می‌دهد. مد دوم، ۸/۳۴ GHz و ۸/۰۸ GHz بسامد مورد نظر است. پهنای باند خالی از بسامد های ناخواسته^۱ بین مدهای اول و دوم تقریبا ۱۰ MHz است که کمتر از پهنای باند مورد نیاز برای عملکرد مناسب توسط مدار نوسان‌سازها است. لازمست بسامد های ناخواسته به منظور نوسان مدار با نویز فاز کم دور از بسامد تشدید نگه داشته شوند. هدف، جداسازی نزدیک ترین مد های مرتبه بالاتر و پایین تر به مد اصلی است. با حذف یا تضعیف این مدها، عملکرد نوسان‌ساز بهبود یافته و از نوسان در بسامد های ناخواسته جلوگیری می‌شود.



شکل (۳): رفتار بسامدی مشدد عایقی در مدهای مرتبه بالا.

شکل (۴) توزیع میدان الکتریکی مشدد عایقی در سه باند بسامد مختلف را نشان می‌دهد، هر نمودار شامل یکی از این بسامد ها است. رفتار بسامدی نشان می‌دهد که در فاصله بسامد های ناخواسته، میدان‌های الکتریکی ضعیف‌تر است. بسامد مورد نظر در پهنای باند ۸/۳۰ - ۸/۱۰ GHz قرار دارد.



(آ)

شکل (۴): توزیع میدان الکتریکی مشدد عایقی در فاصله
 (آ) ۸/۰۵ GHz - ۸/۱۰ GHz، (ب) ۸/۱۰ GHz - ۸/۳۰ GHz، (ج) ۸/۳۰ GHz - ۸/۵۰ GHz.

وجود حلقه و میکرواستریپ افزایش خواهد یافت و ضریب کیفیت کمی کاهش می‌یابد. تلفات هادی ناشی از وجود میکرواستریپ‌ها عبارتند از:

$$if\Phi = 0 \rightarrow H_{\rho} = \frac{\beta a H_0}{p'_{nm}} J'_n \left(\frac{P'_{nm} \rho}{a} \right) \quad (16)$$

$$if\Phi = \frac{\pi}{2} \rightarrow H_{\phi} = \frac{-\beta a^2 H_0}{(p'_{nm})^2 \rho} J_n \left(\frac{P'_{nm} \rho}{a} \right) \quad (17)$$

$$if\Phi = \pi \rightarrow E_{\rho} = \frac{\beta a H_0}{p'_{nm}} J'_n \left(\frac{P'_{nm} \rho}{a} \right) (-1)^n \quad (18)$$

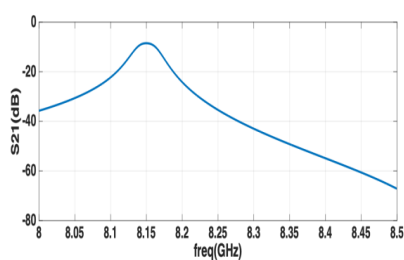
$$if\Phi = \frac{3\pi}{2} \rightarrow H_{\phi} = \frac{-\beta a^2 H_0}{(p'_{nm})^2 \rho} J_n \left(\frac{P'_{nm} \rho}{a} \right) \quad (19)$$

$$P_c = \frac{1}{\delta 6} \left[\left(\frac{\beta a H_0}{\rho_n a} \right)^2 \times \left(\frac{l^2}{2} \right) \left(J_n^2 \left(\frac{P'_{nm} l}{a} \right) \right) + \frac{(\beta a^2 H_0)^2}{\rho_n^2} \left(\frac{n}{l} \right)^n \left(J_n^2 \left(\frac{P'_{nm} l}{a} \right) \right) \right] \quad (20)$$

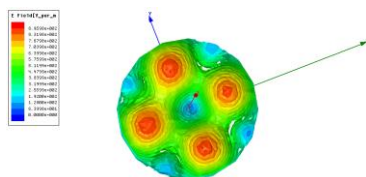
تلفات هادی ناشی از وجود حلقه‌ها عبارتند از:

$$P_c = \frac{1}{\delta 6} \left[\left(\frac{\beta a H_0}{\rho_n a} \right)^2 \times \pi \times \left(\frac{r_2^2 - r_1^2}{2} \right) \left(J_n^2 \left(\frac{P'_{nm} r_2}{a} \right) - J_n^2 \left(\frac{P'_{nm} r_1}{a} \right) \right) + \frac{(\beta H_0)^2 (-n^2)}{\rho_n^2 (r_2^2 - r_1^2)} \left(J_n^2 \left(\frac{P'_{nm} r_2}{a} \right) - J_n^2 \left(\frac{P'_{nm} r_1}{a} \right) \right) \right] \quad (21)$$

بنابراین، با اضافه کردن این روابط به رابطه (۸)، ضریب کیفیت دقیق‌تر مشخص می‌شود. با توجه به معادله لیسون، انتظار می‌رود که نویز فاز با سرعت $20 \log(Q_H/Q_0)$ کاهش یابد، در حالی که Q_H ضریب کیفیت مد مرتبه بالاتر و Q_0 ضریب کیفیت مد اصلی است.



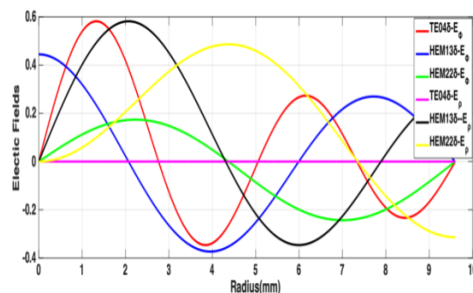
(آ)



(ب)

شکل (۷): (آ) رفتار بسامدی، (ب) توزیع میدان الکتریکی در مشدده عایقی پس از حذف مود.

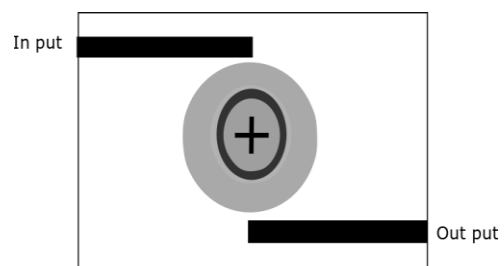
در شکل (۵) میدان‌های الکتریکی هر سه مد در جهت ρ و ϕ رسم شده است.



شکل (۵): میدان‌های الکتریکی در راستای شعاع مشدده عایقی.

نقاطی که مد اصلی دارای میدان الکتریکی صفر است و مد های دیگر دارای میدان الکتریکی حداکثر هستند، به منظور اضافه کردن الگوی فلزی پیشنهادی انتخاب می‌شوند.

با مقایسه گراف‌ها به این نتیجه می‌رسیم که با تضعیف مد TE_{048} در شعاع $5/6$ mm و تضعیف مد HEM_{138} در شعاع $4/4$ mm تأثیر چندانی بر مد اصلی نخواهیم داشت. مقادیر اولیه جهت حذف مدهای ناخواسته در شبیه‌سازی از این گراف حاصل شد و با بهینه‌سازی این مقادیر تغییر یافت که کمترین تأثیر بر روی مد مطلوب را داشته باشد. به منظور تضعیف و یا حذف بسامدهای ناخواسته، دو خط میکرو استریپ، هر خط با زاویه 90° درجه نسبت به دیگری با طول $5/06$ mm (دو برابر $2/53$ mm) به صورت متقارن نسبت به مرکز بر روی بستر قرار می‌گیرند. همچنین یک حلقه فلزی با شعاع بیرونی برابر با $5/61$ mm و ضخامت $1/16$ mm اضافه شده است. شکل (۶) ساختار پیشنهادی را نشان می‌دهد. خطوط و حلقه‌های میکرو استریپ از جنس مس است که ضخامت آن با توجه به ثابت مؤثر عایق در بسامد تشدید مطلوب تعیین می‌شود.



شکل (۶): ساختار پیشنهادی مشدده عایقی جهت حذف بسامد ناخواسته.

با بهینه‌سازی ابعاد، پارامتر پراکندگی ساختار پیشنهادی به صورت شکل (۷) حاصل می‌شود. نشان داده شده است که بسامدهای ناخواسته حذف شده است. این مشدده در مقایسه با یک مشدده با مد TE_{018} ضریب کیفیت بالاتری دارد. علاوه بر این، با اضافه کردن الگوی فلزی در زیرساختار، تلفات هادی ناشی از

- [6] C. McNeilage, J. H. Searls, E. N. Ivanov, P. R. Stockwell, D. M. Green, and M. Mossamaparast, "A Review of Sapphire Whispering Gallery-Mode Oscillators Including Technical Progress and Future Potential of the Technology," in Proceedings of the IEEE Frequency Control Symposium and Exposition, pp. 210–218, Aug. 2004.
- [7] M. Khajavi, N. Khajavi, F. Hojat Kashani, "Designing a Microstrip Dual-Band Bandpass Filter (BPF) with Suitable Isolation between Two Passband," Iran University of Science and Technology Journal of "Radar" Vol. 4, No. 4, 2017.
- [8] S. J. Bale, P. D. Deshpande, M. Hough, S. J. Porter, and J. K. A. Everard, "High-Q Tuneable 10-GHz Bragg Resonator for Oscillator Applications," IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, vol. 65, no. 2, Feb. 2018.
- [9] R. Zhang and R. R. Mansour, "Dual-Band Dielectric-Resonator Filters," IEEE Trans Microw Theory Tech, vol. 57, pp. 1760-1766, 2009.
- [10] M. Memarian and R. R. Mansour, "Dual-Band Half-Cut Dielectric Resonator Filters", Microwave Conference, 2009. EuMC 2009, pp. 555-558, European, 2009.
- [11] I. C. Hunter, "Theory and design of microwave filters", Institution of Engineering and Technology. London, 2001.
- [12] R. Zhang and R. R. Mansour, "Dual-Band Dielectric-Resonator Filters", IEEE Trans Microw Theory Tech, vol. 57, pp. 1760-1766, 2009.
- [13] O. Di Monaco, Y. Kersale, and V. Giordano, "Resonance Degeneration and Spurious Mode Suppression in a Cryogenic Whispering Gallery Mode Sapphire Resonator," IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett., vol. 10, no. 9, Sep. 2000.
- [14] Y. Kobayashi, and S. Tanaka, "Resonant Modes of a Dielectric Rod Resonator Short-Circuited at Both Ends by Parallel Conducting Plates," IEEE Trans Microw Theory Tech, vol.28, no. 10, Oct. 1980.
- [15] A. M. Ghuniem, A. A. Mitkees, and N. T. Messiha, "Excitation of the Hybrid Electromagnetic Modes of Cylindrical Dielectric Resonator", 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEEG2004), MTC, Cairo, Egypt, AW4, pp. 1-12, Nov. 23-25, 2004.

۶. نتیجه گیری

مزیت استفاده از مدهای مرتبه بالاتر در مشددهای با سایز بزرگ بهبود ضریب کیفیت است. نتایج نشان داد که ساختار پیشنهاد شده مد $HEM_{22\delta}$ دارای ۵۰٪ افزایش در ضریب کیفیت در مقایسه با مد $TE_{01\delta}$ است. بهرغم افزایش ضریب کیفیت، محدود شدن فاصله بسامدی ناشی از حضور مدهای ناخواسته که در طراحی نوسان‌سازهایی با نویز کم باعث ایجاد مشکلاتی در نوسانات در بسامد اصلی تشدید می‌شود. شکل فلزی پیشنهاد شده به منظور حذف یا جابه‌جایی بسامدهای ناخواسته به خارج از منطقه نوسان به ساختار افزوده شده است. لازم بذکر است با اضافه شدن فلزها مقدار ضریب کیفیت کاهش می‌یابد و از ۱۲۴۵۰ به ۱۱۵۰ می‌رسد البته نسبت به مد $TE_{01\delta}$ بالاتر می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی بیانگر درستی ایده ارائه شده در تحریک مدهای بالاتر و به‌طور موثر حذف مدهای مزاحم است.

۷. مراجع

- [1] D. M. Pozar, "Microwave engineering", USA, NY, New York: Wiley, 2012
- [2] C. Sanabria, Noise of AlGaIn/GaN HEMTs and Oscillators. PhD thesis, University of California Santa Barbara, 2006.
- [3] J.K.A. Everard and M.A. Page-Jones, "Ultra Low Noise Microwave Oscillators with Low Residual Flicker Noise", IEEE MTT-S Int Microw Symp, Orlando, Florida, vol.16, no. 20, pp. 693–696, May, 1995
- [4] S. Bunnjaveht, M.J. Underhill, I.D. Robertson, "Sideband Noise Reduction in Transposed Gain Oscillators", Proceedings of the 2003 International Symposium on Circuits and Systems, May.2003.
- [5] J. Everard, "With Low Noise Oscillators", Fundamentals of RF Circuit Design, Hoboken, NJ, USA: Wiley, Dec. 2000

Spurious Mode Rejection in an Oversized Dielectric Resonator by Microstrip Metallic Pattern

Z. Soltani, SH. Asadi*

Shahid Beheshti University

(Received: 22/06/2019, Accepted: 26/08/2019)

Abstract

In order to achieve a low phase noise oscillator, designing a high Q resonator is inevitable. Exciting higher order modes is an appropriate method to increase the quality factor. Existence of unwanted modes is a major issue that appears in higher order mode excitation. The oscillator circuit cannot oscillate in the desirable mode due to low mode separation. This paper presents a design methodology for DR which leads to spurious performance improvement in higher order modes in addition to the rejection of unwanted frequencies. The goal is controlling the frequency separation between resonance and unwanted frequencies in order to implement in low noise oscillators. In an eight-GHz dielectric resonator excited by $TE_{22\delta}$ mode, the quality factor equals to 12450 which is higher than a DR excited by $TE_{01\delta}$ mode with a quality factor of 8100. Also, unwanted frequencies at 8.05 GHz and 8.3 GHz are suppressed by the proposed technique with minimum impact on the main resonance mode.

Keywords: Higher Order Mode, Oversized Resonator, Unwanted Mode Rejection

* Corresponding author E-mail: sh_asadi@sbu.ac.ir

