

نوسانگر دوبانده تنظیم‌پذیر با استفاده از تکنولوژی MEMS

سیده شیرین صابر حسینی^۱، بهرام عزیزالله گنجی^۲، ایاز قربانی^۳، جواد کوهسرخ^۴

^۱دانشجو دکترا برق - الکترونیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

^۲دانشیار دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، baganji@nit.ac.ir

^۳استاد دانشکده برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

^۴دانشیار دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

چکیده

در این مقاله یکی از کاربردهای تکنولوژی MEMS در حوزه سیستم‌های مخابراتی بیان می‌گردد. برای اولین بار با استفاده از یک خازن متغیر MEMS در نوسانگر CSRR یک روش جدید برای تنظیم‌پذیری و چندباند کردن نوسانگرهای مخابراتی به صورت مستقل و همزمان ارائه می‌شود. علاوه بر این قابلیت، به منظور کاهش نویزپذیری ناشی از اتصالات غیرمجموع و نیز با اهداف کاهش مساحت، تلفات و همچنین به منظور یکپارچه‌سازی با المان MEMS، نوسانگر CSRR بر روی یک خط *Half mode substrate integrated waveguide (HMSIW)* با تکنولوژی ساخت مدارات مجتمع پیاده‌سازی می‌گردد. بعلاوه در این مقاله به کمک نرم افزار HFSS رفتار فرکانسی ساختار شبیه‌سازی مغناطیسی شده است. نتایج به دست آمده بیانگر این موضوع است که افت عبوری ساختارهای ارائه شده کمتر از 1 dB و تلفات برگشتی بیشتر از 15 dB می‌باشد، همچنین محدوده فرکانس نوسان نوسانگر ارائه شده در باند S و با رفتار فرکانسی مشابه و قابل تطبیق با ساختارهای برد مدار چاپی است. در این شرایط، مساحت این ساختار با انتخاب زیرلایه مناسب برای مجتمع‌سازی تا پنج برابر نسبت به ساختارهای مرسوم کمتر شده است. فرآیند ساخت پیشنهادی برای ساختار دوبانده تنظیم‌پذیر نیز مبتنی بر ادوات و تکنولوژی ساخت مدارات مجتمع موجود می‌باشد.

کلیدواژه

نوسانگر HMSIW، خازن MEMS، دوبانده کردن، قابل تنظیم کردن، مجتمع‌سازی.

مقدمه

عملکرد بهتر و ابعاد کوچک‌تر یک جایگزین بسیار محبوب برای موجبرهای معمولی است [2]. نوسانگرهای پیاده‌سازی شده با این خط نیز به آسانی می‌توانند با سایر مدارات مسطح مجتمع‌سازی شوند که این موضوع به شدت موجب کاهش هزینه ساخت سیستم‌های مخابراتی شده و تکرارپذیری تولید را نیز بهبود می‌بخشد [3].

در ساختار SIW، صفحه تقارن در راستای جهت انتقال به عنوان یک دیوار مغناطیسی کامل در نظر گرفته می‌شود. از این رو، امکانی ایجاد می‌گردد که با برش صفحه، ساختار SIW به دو بخش تقسیم گردد که به آن خط SIW نیم مد (HMSIW) گفته می‌شود. این موضوع موجب کاهش ابعاد نسبت به ساختار اولیه خواهد شد در حالی که خصوصیات انتشار و تلفات آن مشابه خط SIW کامل می‌باشد. از مزایای این خط می‌توان به قابلیت

نوسانگر قابل تنظیم با تلفات پایین یک المان اصلی در سیستم‌های مخابراتی چندباند است. از این رو ارائه چنین ساختاری باعث کاهش اندازه و در نتیجه کاهش پیچیدگی سیستم‌های مخابراتی می‌شود. همچنین طراحی و توسعه این ساختارها در سال‌های اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. از طرف دیگر، با ارائه ساختار چندباند تعداد زیرسیستم‌ها در این گونه مدارات نیز کاهش می‌یابد. به طور معمول، نوسانگر دوبانده با تلفات پایین با استفاده از موجبرهای مرسوم پیاده‌سازی می‌شوند. می‌توان گفت که چالش اصلی این سیستم‌ها اندازه، هزینه و مجتمع‌سازی آن‌ها می‌باشد [1]. موجبر مجتمع شده در بستر^۱ (SIW) نوع جدیدی از خط انتقال است که در آن موجبر بر روی برد مدار چاپی پیاده‌سازی می‌گردد. این نوع خط به دلیل

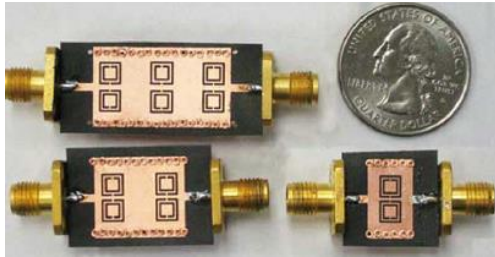
^۲ Half mode substrate integrated waveguide

^۱ Substrate Integrated Waveguide

انتخاب شده و با اضافه کردن یک خازن متغیر RF MEMS به ساختار، خصوصیات قابل تنظیم بودن و دوبانده شدن محقق می‌گردد.

نوسانگر HMSIW مبتنی بر CSRR

نوسانگر HMSIW مبتنی بر CSRR ساختار مرسوم است که تا کنون بر روی برد عایق Arlon Diclاد 880 ارائه شده که این ساختار در بازه فرکانسی کمتر از 10GHZ کار می‌کند [5]. نمایی از ساختار موجود در شکل 1 نشان داده شده است.



شکل 1. نوسانگر CSRR بر روی خط HMSIW [5]

طبق توضیحات، هدف پیاده‌سازی خط HMSIW با فرآیند میکروماشین کاری است به طوری که قابلیت یکپارچه‌سازی با سایر مدارات الکترونیکی را داشته باشد. لذا انتخاب زیرلایه مناسب برای تامین این اهداف مهم می‌باشد.

در شرایط فرکانس کاری ثابت و با هدف کاهش ابعاد، سیلیکون با ثابت دی‌الکتریک 11.7، ضخامت $360\mu\text{m}$ و مقاومت ویژه بالا ($\rho=10\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$) به عنوان زیرلایه جایگزین برای برد مدار چاپی انتخاب می‌شود. حال با توجه به حفظ طرح و مشخصات فرکانسی ثابت، به ازای فرکانس قطع موجبر 8.8GHz ، طبق رابطه زیر [19]

$$f_{c(TE_{10})} = \frac{c}{4w_{\text{HMSIW}}\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

و با جایگذاری پارامترهای مختلف، پهنای موثر موجبر $w_{\text{HMSIW}}=2.5\text{mm}$ بدست می‌آید.

به منظور کاهش تلفات، قطر وایا⁶ برابر 0.3 میلی‌متر ($d=0.3\text{mm}$) و فاصله مرکز تا مرکز برابر 0.6 میلی‌متر ($S=0.6\text{mm}$) تعیین می‌شود. برای اعمال امواج الکترومغناطیسی به ساختار، لازم است که از یک خط ریزنوار در دو سمت استفاده گردد. لذا این خط طبق روابط مربوط به آن و با استفاده از نرم‌افزارهای آنلاین طراحی می‌شود. برای داشتن امپدانس 50Ω ، لازم است که پهنای خط ریزنوار $w_1=290\mu\text{m}$ باشد و لذا این خط بدون هیچ واسطه انتقالی به خط HMSIW متصل می‌شود. در شکل 2 نمای بالا از ساختار HMSIW طراحی شده، نشان داده شده است.

کنترل بهتر ضریب کیفیت و عدم نیاز به واسطه انتقال اشاره کرد [1].

تاکنون، روش‌های متعدد و مستقلی برای تنظیم‌پذیری و چندباندی کردن نوسانگرها ارائه شده است. از جمله [4] از سویچ‌های تجاری MEMS³ برای تنظیم فیلتر استفاده نموده است. همچنین استفاده از دیود وراکتور در نقاط مختلف ساختار نوسانگر به عنوان خازن متغیر، راهکاری دیگر برای جابجایی فرکانس در [5-7] ارائه شده است. از طرفی در [8] یک مقاومت صفر اهم به عنوان سویچ در داخل نوسانگر بکار رفته و در بین دو فرکانس مشخص تغییر وضعیت می‌دهد.

برخلاف تنظیم‌پذیری، می‌توان گفت که برای چندباندی کردن روش‌های محدودی وجود دارد. در مجموعه‌ای از مقالات با تغییر در ساختار نوسانگر، دومین فرکانس ذاتی نوسانگر را به زیر فرکانس قطع موجبر منتقل می‌کنند [9]. در مقاله دیگر [10] با اضافه کردن یک صفحه و ایجاد نقش معادل خازن، باند دوم را ایجاد کرده‌اند. در جدیدترین کار [11]، علاوه بر سمت خط، در سمت زمین نیز یک نوسانگر محقق شده است که باعث ایجاد یک فرکانس عدم عبور در وسط باند فرکانسی فیلتر شده و به این صورت ساختار دوبانده می‌شود.

در این مقاله، نوسانگر بر مبنای خط HMSIW و تلفیق با تکنولوژی MEMS ارائه شده است. استفاده از تکنولوژی MEMS به دلیل تلفات کم، خاصیت خطی‌پذیری، ابعاد کوچک، سازگاری با تکنولوژی‌های دیگر و توانایی کاربرد در فرکانس‌های بالا مورد توجه قرار گرفته است [12]. از این رو، امروزه استفاده از تکنولوژی MEMS در ساخت ادوات و تجهیزات مخابراتی همچون انواع سویچ‌های خازنی RF MEMS [13-15]، تغییردهنده‌های فاز [16 و 17]، آنتن [18] و ... مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. از طرف دیگر، متداول‌ترین نوسانگرهای SIW با تکنولوژی برد مدار چاپی⁴ (PCB) ساخته می‌شوند. اتصالات بین این قطعات به صورت خارجی و غیرمجموعه است که این موضوع باعث نویزپذیری بالا می‌گردد. همچنین این اتصالات، فرکانس کاری سیستم‌های مخابراتی را هم تحت تاثیر قرار می‌دهند. به منظور افزایش فرکانس کاری قطعه و بهبود یکپارچه‌سازی بین SIW و المان MEMS، در این مقاله یک ساختار SIW تمام مجتمع ارائه می‌شود. در کارهای انجام شده مبتنی بر ساختار SIW [4-10]، قابل تنظیم بودن و چندباندی‌سازی به صورت مجزا انجام شده است. اما در این کار، برای اولین بار روش جدیدی برای تحقق این اهداف به صورت همزمان ارائه شده است. یک نوسانگر HMSIW فشرده، مسطح، مبتنی بر ساختار تشدیدکننده شکاف حلقوی مکمل⁵ (CSRR)

⁵ Complementary Split Ring Resonator
⁶ Via

³ Microelectromechanical System
⁴ Printed Circuit Board

ساختار، مطابق شکل 4) الف خازنی به صورت موازی با تانک LC مربوط به CSRR قرار داده می‌شود. به منظور کاهش نویزپذیری و تحقق ساختاری یکپارچه، خازن متغیر به صورت MEMS پیاده‌سازی می‌گردد که براساس مدار معادل، خازن متغیر در تماس با خط است. از این رو برای مدل‌سازی چنین ساختاری، پل MEMS که نقش خازن متغیر را دارد به گونه‌ای قرار می‌گیرد که در کوپل و تماس مستقیم با خط باشد. بنابراین می‌توان طرح اولیه آن را مطابق شکل 4) ب، به صورت یک پل موازی بر روی ساختار پیاده‌سازی کرد. در این ساختار L_b طول، W_b عرض و T_b ضخامت پل MEMS است. لازم به ذکر است که ابعاد این پل، وابسته به ساختار CSRR تعیین می‌گردد. x ، ارتفاع پل (فاصله هوایی) نسبت به خط زیرین آن است.

خازن MEMS در فاصله هوایی موجود بین پل MEMS و خط زیرین آن تشکیل می‌گردد که ظرفیت آن برابر است با:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{x} \quad (3)$$

در این شرایط دو مسیر موازی انتقال سیگنال در ساختار ایجاد می‌شود. بنابراین فرکانس نوسان برابر می‌شود با

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r(C_r + C_{MEMS})}} \quad (4)$$

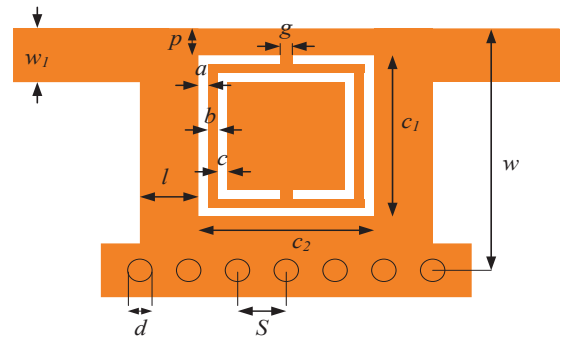
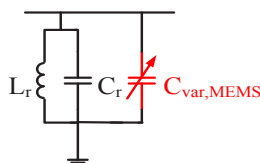
حال اگر در این شرایط یک مولفه ولتاژ dc با نام V_p به پل اعمال گردد، در حالی که به الکتروود زیرین صفر ولت وصل شود. این اختلاف ولتاژ بین پل و الکتروود، باعث ایجاد نیروی الکترواستاتیکی بین آن‌ها می‌گردد. این نیرو باعث تغییر در ارتفاع پل (x) و در نتیجه تغییر در ظرفیت خازن MEMS خواهد شد که رابطه (5) ارتباط بین نیرو و ولتاژ اعمالی را بیان می‌نماید [12]:

$$F_d = \frac{\partial E}{\partial x} = \frac{1}{2} (V_p)^2 \frac{\partial C}{\partial x} \quad (5)$$

در این شرایط خازن MEMS دارای ظرفیت متغیر خواهد بود و طبق رابطه 4، فرکانس نوسان نیز تنظیم پذیر می‌باشد. همچنین در شکل‌های 5) الف و 5) ب به ترتیب، نمای جانبی ساختار، قبل و بعد از اعمال نیروی الکترواستاتیک نشان داده شده است.

دوبانده کردن

براساس ساختار مورد استفاده و مدار معادل آن و همچنین روش‌های دوبانده کردن، به گونه‌ای تغییرات در مدل مداری اعمال می‌گردد که دو فرکانس نوسان ایجاد شود. لذا لازم است که تغییرات، این مرتبه نیز در شاخه تانک LC موازی انجام پذیرد. برای این منظور با اضافه کردن خازن سری به ساختار، مسیر تزویج جدیدی از تانک LC به زمین ایجاد می‌شود.



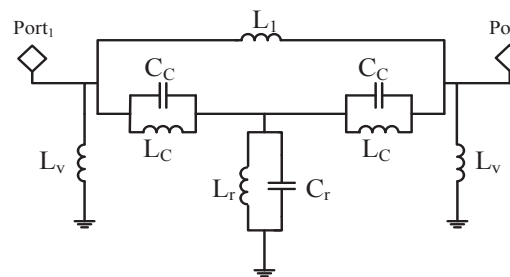
شکل 2. نمای بالا نوسانگر HMSIW-CSRR

ساختار CSRR با ابعاد ذکر شده در جدول 1 بر روی سطح فلزی در بالای موجبر پیاده می‌شود.

جدول 1. ابعاد ساختار نوسانگر HMSIW-CSRR

فاصله	$g=a=b=c$	w	$c_1=c_2$	l	p
اندازه	0.1mm	2.5mm	1.8mm	0.35mm	0.2mm

باید متذکر شویم که تا حال حاضر، مدل‌سازی دقیقی برای ساختارهای SIW ارائه نشده است. اما مدل تقریبی و تجربی از این خط انتقال در [19]، براساس مفاهیم و نوع عملکرد هر بخش، ارائه شده است. بر این اساس برای ساختار پیشنهادی، مدل تجربی در [20] ارائه گردیده که نمونه ای از آن در شکل 3 نشان داده شده است. در این مدل L_v اندوکتانس معادل وایها، L_c و C_c به ترتیب اندوکتانس اتصال و خازن تزویج، L_r و C_r اندوکتانس و خازن نوسانگر و L_1 اندوکتانس اتصال در نظر گرفته می‌شود.



شکل 3. مدل مداری ارائه شده برای نوسانگر HMSIW-CSRR [20]

قابل تنظیم و دوبانده کردن نوسانگر

تنظیم کردن

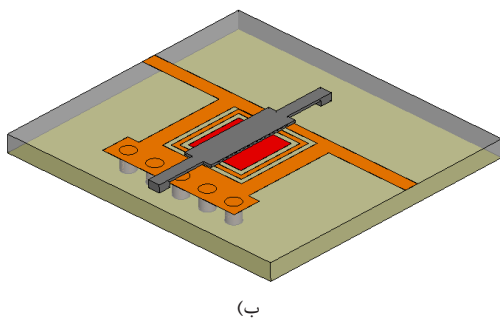
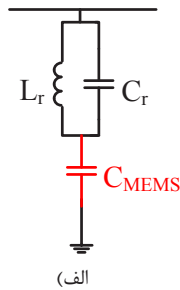
مطابق شکل 3، فرکانس نوسان ساختار که وابسته به نوسانگر CSRR است، طبق رابطه زیر تعیین می‌شود [21].

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \quad (2)$$

بر این اساس، فرکانس ذاتی ساختار CSRR را می‌توان به صورت الکترونیکی، با اضافه کردن خازن متغیر به هادی داخلی CSRR، تنظیم کرد [8]. برای تنظیم و یا جابجایی فرکانس نوسان

را به صورت یک پل موازی جدید بر روی ساختار پیاده‌سازی نمود.

ابعاد پل با توجه به ساختار CSRR و پارامترهای دیگر به دست می‌آید. در این شرایط فقط یک مسیر انتقال سیگنال در ساختار وجود دارد.



شکل 6. ساختار نوسانگر دوبانده پیشنهادی (الف) مدل مداری خازن MEMS. (ب) شماتیک ساختار

ساختار دوبانده قابل تنظیم

با ترکیب دو روش ارائه شده، یعنی اعمال نیروی الکترواستاتیک به پل MEMS در ساختار نوسانگر دوبانده که معادل تغییر ظرفیت خازن است، تغییر و انتقال در فرکانس‌های مرکزی هر دوبانده ایجاد می‌گردد.

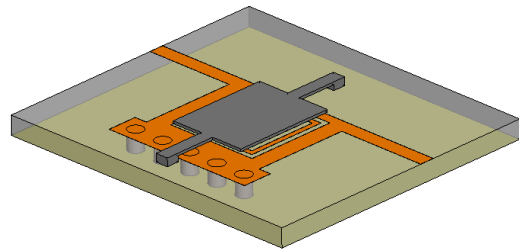
نتایج و بحث

همان‌طور که گفته شد، استفاده از مدارهای معادل تجربی و تقریبی در ساختارهای SIW، سنجش صحیحی در بررسی عملکرد و رفتار فرکانسی طرح‌های پیشنهادی نمی‌باشند. لذا برای تحلیل عملکرد و رفتار فرکانسی طرح‌های ارائه‌شده، شماتیک این ساختارها در نرم‌افزار HFSS شبیه‌سازی می‌شود.

نوسانگر پایه

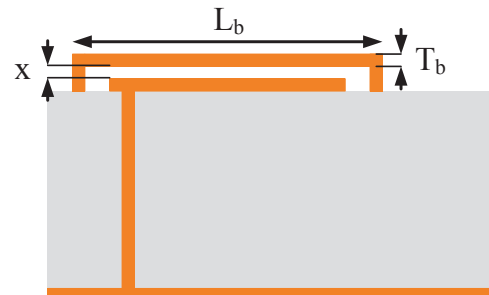
در شکل 7 نتایج شبیه‌سازی پارامترهای پراکندگی از نوسانگر طراحی شده بر روی زیرلایه سیلیکون با ثابت دی الکتریک 11.7، ضخامت $360\mu\text{m}$ و مقاومت ویژه بالا ($\rho=10\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که این زیرلایه جایگزین زیرلایه برد مدار چاپی می‌باشد. همچنین نتایج این نمودار حاکی

(الف)

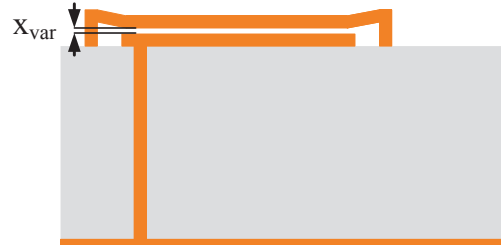


(ب)

شکل 4. ساختار نوسانگر قابل تنظیم پیشنهادی (الف) مدل مداری خازن متغیر MEMS. (ب) شماتیک ساختار



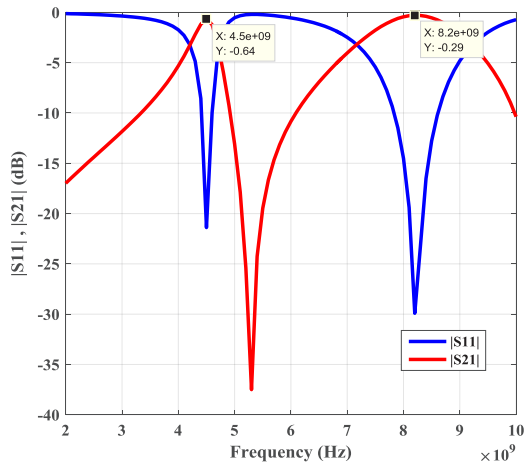
(الف)



(ب)

شکل 5. نمای جانبی ساختار نوسانگر قابل تنظیم پیشنهادی (الف) قبل از اعمال نیروی الکترواستاتیک، (ب) بعد از اعمال نیروی الکترواستاتیک با قرار دادن این خازن سری در مدار معادل، باند دوم فرکانسی در زیر فرکانس قطع موجبر محقق می‌گردد که ساختار پیشنهادی در شکل 6 نشان داده شده است.

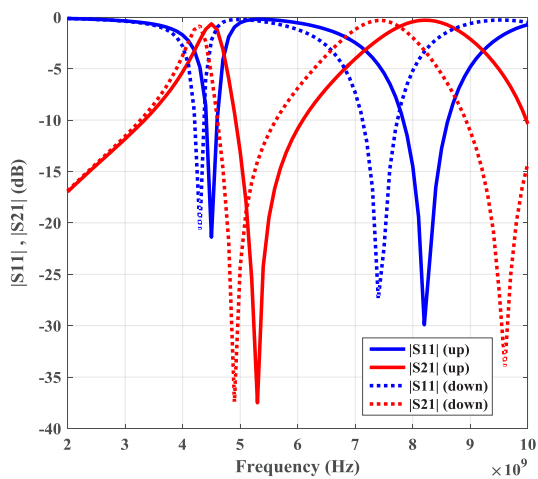
در این مرحله نیز خازن مورد نظر به صورت MEMS پیاده‌سازی می‌گردد. این خازن در تماس مستقیم با خط نبوده و از طریق تانک عمودی LC به زمین متصل می‌شود. با توجه به موقعیت خازن در مدل مداری، این خازن به نوسانگر CSRR تزویج شده و از آن مسیر به خط اتصال می‌یابد. در نتیجه پهنای پل MEMS، باید از پهنای ساختار CSRR کمتر باشد، تا به صورت مستقیم به خط متصل نگردد. لذا می‌توان طرح اولیه آن



شکل 9. نتایج شبیه‌سازی نوسانگر دوبانده بر روی بستر HR Si

نوسانگر دوبانده قابل تنظیم

در این شرایط نیز با اعمال ولتاژ DC، می‌توان پل MEMS نشان داده شده در شکل 6 را حداکثر تا یک سوم فاصله هوایی آن جا به جا کرد.



شکل 10. نتایج شبیه‌سازی نوسانگر دوبانده قابل تنظیم بر روی بستر HR Si

مطابق شکل 10، در ساختار دوبانده فرکانس‌های نوسان از 4.5GHz و 8.2GHz تا 4.3GHz و 7.4GHz جا به جا می‌گردند.

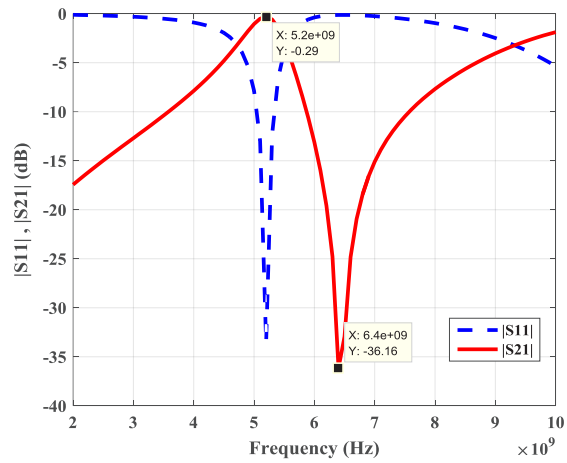
به کمک رابطه (6) می‌توان ضریب کیفیت در ساختار نوسانگر ارائه شده را به دست آورد [19]:

$$Q = \frac{2f_r}{\Delta f_{3-dB}} \quad (6)$$

در این رابطه، f_r فرکانس نوسان و Δf_{3-dB} پهنای باند 3-dB کمتر از مقدار بیشینه است که از روی نمودار S_{21} تعیین می‌گردد.

در جدول 2 مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی الکترومغناطیسی و پارامتر ضریب کیفیت HMSIW-CSRR بر روی زیرلایه HR Si انجام شده است.

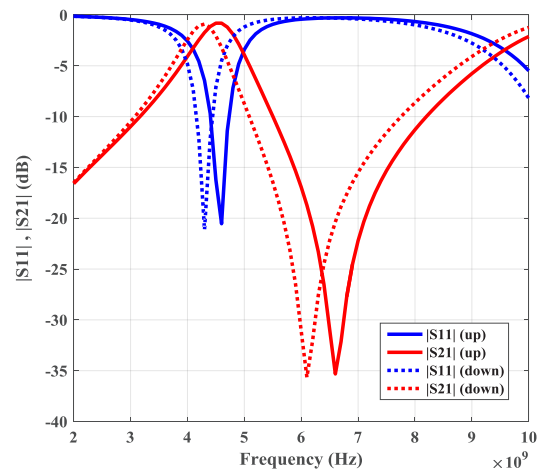
از آن است که فرکانس نوسان 5.2GHz و فرکانس انتقال صفر 6.4GHz است.



شکل 7. نتایج شبیه‌سازی نوسانگر HMSIW-CSRR طراحی شده بر روی بستر HR Si

نوسانگر قابل تنظیم

با قرار گرفتن پل MEMS بر روی ساختار نوسانگر مطابق شکل 4، فرکانس نوسان ساختار 4.6GHz می‌شود. حال با اعمال ولتاژ DC می‌توان پل را حداکثر تا یک سوم فاصله هوایی جا به جا کرد. در این حالت فرکانس نوسان ساختار تا 4.3GHz جا به جا می‌گردد. در شکل 8 نتایج حاصل از شبیه‌سازی انتقال فرکانس نوسان به محدوده پایین‌تر نشان داده شده است.



شکل 8. نتایج شبیه‌سازی نوسانگر قابل تنظیم بر روی بستر HR Si

نوسانگر دوبانده

با قرار دادن پل MEMS نشان داده شده در شکل 6 بر روی ساختار نوسانگر، یک ظرفیت خازنی ثابت به ساختار اعمال می‌گردد که این خازن موجب تشکیل دو فرکانس نوسان مطابق شکل 9 در فرکانس‌های 4.15GHz و 7.2GHz می‌گردد.

جدول 2. مقایسه نتایج شبیه سازی نوسانگرهای ارائه شده HMSIW-CSRR بر

روی بستر HR Si

رزوناتور دوبانده قابل تنظیم		رزوناتور دوبانده		رزوناتور قابل تنظیم		رزوناتور پایه	
7.4	4.3	8.2	4.5	4.3	4.6	5.2	f_r (GHz)
10	24.6	8.2	15	13	13	13	Q

برای بررسی عملکرد طرح ارائه شده، نتایج ساختارهای پیشنهادی با نمونه‌های مشابه موجود مقایسه می‌گردند.

در جدول 3 مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از نوسانگر قابل تنظیم پیشنهادی با ساختار [5] که توسط دیود و رکتور تنظیم شده، ارائه گردیده است. در این مقاله ایده استفاده از خازن MEMS مورد بررسی قرار گرفته است و ساده‌ترین طرح برای آن در نظر گرفته شده است. با طراحی و استفاده از ساختارهای متنوع برای المان MEMS می‌توان محدوده تنظیم پذیری فرکانس را افزایش داد.

جدول 3. مقایسه نتایج نوسانگرهای HMSIW-CSRR قابل تنظیم

این کار	فرکانس نوسان (GHz)	ضریب کیفیت (Q)
	4.3 - 4.6	13
[5]	2.3 - 2.7	15

در جدول 4 نیز مقایسه‌ای بین نتایج نوسانگر دوبانده با دو ساختار معرفی شده در [9] و [10] انجام شده است. در این بخش هم ایده ایجاد فرکانس دوم نوسان با استفاده از خازن MEMS با ساده‌ترین طرح برای آن مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به فرکانس‌های نوسان ساختار، می‌توان طراحی متنوعی برای المان MEMS انجام داد.

جدول 4. مقایسه نتایج نوسانگرهای HMSIW-CSRR دوبانده

این کار	فرکانس نوسان (GHz)	ضریب کیفیت (Q)
	8.2 و 4.5	8.2 و 15
[9]	3.5 و 5.85	8 و 14
[10]	3.5 و 5.8	23 و 20.5

از آنجایی که در حال حاضر، ساختار نوسانگر HMSIW-CSRR به طور همزمان برای حالت دوبانده تنظیم پذیر ارائه نگردیده است، لذا مقایسه‌ای در این بخش نمی‌توان ارائه کرد.

از طرف دیگر، با انتخاب زیرلایه جدید نسبت به زیرلایه‌های متعارف PCB و با حفظ ویژگی‌های عملکردی نوسانگر، تا پنج برابر مساحت ساختار پیشنهادی کاهش یافته است. علاوه بر کوچک سازی، با انتخاب این زیرلایه امکان مجتمع سازی ساختار

روزناتور با مدارات جانبی الکترونیکی نیز فراهم می‌گردد که این موضوع باعث کاهش نویز پذیری اتصالات نیز خواهد شد. همچنین این ساختار به شدت هزینه ساخت سیستم‌های مخابراتی را کاهش داده و تکرار پذیری تولید را بهبود می‌بخشد.

فرایند ساخت پیشنهادی

دلیل استفاده از زیرلایه جدید، کاهش ابعاد و امکان مجتمع سازی نوسانگرهای موجود است که این موضوع یک مزیت اساسی می‌باشد. لذا در ادامه، مراحل ساخت برای تحقق این ساختارها پیشنهاد و تشریح می‌گردد.

مطابق شکل (11) الف یک ویفر سیلیکونی 4 اینچی با ضخامت $400\mu\text{m}$ و مقاومت ویژه بالا ($\rho=10\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$) به عنوان زیرلایه انتخاب می‌شود. سپس با استفاده از دستگاه زدایشگر یونی عمیق^۷ (DRIE) و به کمک ماسک کروم جای حفره‌های وایهای خط SIW خالی می‌شود، همانطور که در شکل (11) ب نشان داده شده است. در ادامه برای ساختن وایهای فلزی در داخل سیلیکون مطابق شکل (11) پ، حفره‌ها با مس و با فرایند الکتروپلیتینگ پر می‌شوند. لازم به ذکر است که در این فرایند نیاز به لایه اولیه مس بوده و این کار از طریق لایه‌نشانی سطح پشت ویفر با روش رسوب فیزیکی بخار^۸ PVD انجام می‌پذیرد. برای برداشتن لایه‌های مس اضافه در بالا و همچنین رسیدن به وایا از سطح زیرین زیرلایه، پولیش مکانیکی شیمیایی^۹ CMP انجام می‌شود تا ضخامت زیرلایه موجب به اندازه $360\mu\text{m}$ برسد، همانطور که در شکل (11) ت مشاهده می‌گردد.

سپس برای ساخت لایه کروم/طلا با ضخامت $100\text{nm}/25\text{nm}$ در هر دو سمت ویفر با دستگاه کند و پاش، لایه‌نشانی صورت می‌پذیرد. مطابق شکل (11) ث لایه طلا در سطح بالایی به عنوان لایه اولیه برای الکتروپلیت طلا استفاده می‌شود. در حالی که لایه سطحی زیرین به عنوان زمین خط ریزناری و سطح فلزی پایینی موجب استفاده می‌گردد. بعد از الکتروپلیت طلا به اندازه $3\mu\text{m}$ در سطح بالا، طرح مربوط به ساختار نوسانگر با فرایند الکتروپلیت در آن ایجاد می‌شود، همانطور که در شکل (11) ج نشان داده شده است. تا این مرحله ساخت نوسانگر پایه با استفاده از فرایند ساخت مدارات مجتمع فراهم می‌گردد.

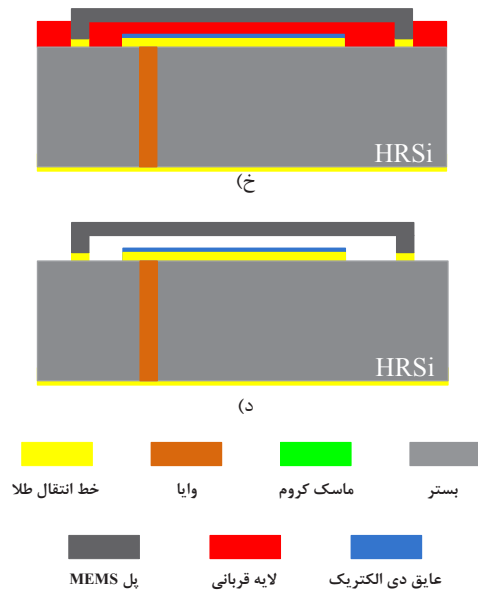
برای تحقق قطعه پل MEMS لازم است مراحل زیر در ادامه فرایند ساخت اجرا شود. براساس شکل (11) چ، برای جلوگیری از اتصال کوتاه الکتریکی پل MEMS و خط انتقال، یک لایه نیتريد سیلیکون با ضخامت 300nm به عنوان عایق دی‌الکتریک با روش رسوب بخار شیمیایی تحت پلاسما^{۱۰} PECVD و بر روی خط انتقال لایه‌نشانی می‌شود.

⁹ Chemical Mechanical Polishing

¹⁰ Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition

⁷ Deep Reactive Ion Etching

⁸ Physical Vapor Deposition



شکل 11. گام‌های پیشنهادی ساخت نوسانگر HMSIW دوبانده تنظیم‌پذیر با تکنولوژی ساخت MEMS بر روی بستر HR Si

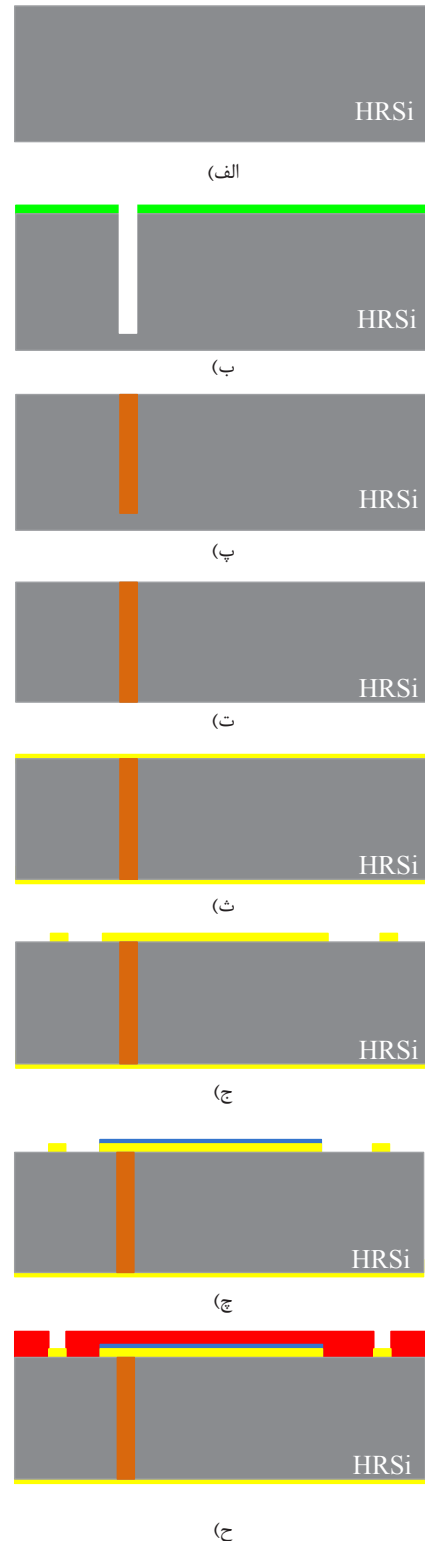
جمع بندی

در این مقاله ترکیب تکنولوژی MEMS با سیستم‌های مخابراتی به صورت کاربردی بیان گردید. همچنین برای اولین بار تنظیم‌پذیری و چندباند شدن نوسانگرهای مخابراتی به صورت مستقل و همزمان با ایده استفاده از یک خازن متغیر MEMS در نوسانگر CSRR بررسی گردید. همچنین نشان داده شد که با اهداف کاهش مساحت، تلفات، نویزپذیری و همین‌طور به منظور یکپارچه‌سازی با المان MEMS می‌توان کل ساختار را با استفاده از تکنولوژی ساخت مدارات مجتمع به صورت همزمان بر روی زیرلایه سیلیکون با مقاومت بالا پیاده‌سازی کرد. بعلاوه ملاحظه شد که با انتخاب زیرلایه مناسب برای مجتمع‌سازی، مساحت این ساختار تا پنج برابر نسبت به ساختارهای مرسوم کمتر می‌شود. لازم به ذکر است که بررسی رفتار فرکانسی ساختارها با شبیه‌سازی مغناطیسی و با استفاده از نرم‌افزار HFSS در این مقاله انجام پذیرفته است که در کلیه حالات، تلفات عبوری ساختارهای ارائه شده کمتر از 1 dB و تلفات برگشتی بیشتر از 15 dB بدست آمده است. همچنین فرآیند ساخت پیشنهادی مبتنی بر ادوات و تکنولوژی ساخت مدارات مجتمع موجود ارائه گردیده است.

مراجع

- [1] V. Sekar, K. Entesari, "A novel compact dual-band half-mode substrate integrated waveguide bandpass filter," International Microwave Symposium Digest (MTT), pp. 1-4, Jun. 2011.

فتورزیست به عنوان لایه قربانی نشانده و الگودهی می‌شود همانطور که در شکل 11 ح مشاهده می‌گردد. سپس مطابق شکل 11 خ، پل MEMS از جنس نیکل و با ضخامت $3\mu\text{m}$ با فرآیند الکتروپلیتینگ ساخته می‌شود. در نهایت لایه قربانی با فرآیند پلاسما اکسیژن برداشته می‌شود و پل MEMS معلق می‌ماند که این موضوع در شکل 11 د نشان داده شده است.



- [14] K. Khodadady, B. A. Ganji, "Design and modeling of a novel RF MEMS series switch with low actuation voltage," *Microsystem Technologies*, vol. 22, no. 12, pp. 2921-2929, December 2016.
- [15] K. G. Sravani, K. S. Rao, D. Prathyusha, et al., "Design and performance analysis of double cantilever type capacitive shunt RF MEMS switch," *Microsystem Technologies*, vol. 26, pp. 345-352, 2020.
- [16] A. Razeghi, B. A. Ganji, "A novel design of RF MEMS dual band phase shifter," *Microsystem Technologies*, vol. 20, no. 3, pp. 445-450, March 2014.
- [17] B. A. Ganji, A. Razeghi, "A new design of dual band phase shifter using MEMS Technology," *IJE Transactions B: Application*, vol. 26, No. 11, pp. 1385-1394, November 2013.
- [18] H. Mahmoodnia, B. A. Ganji, "A novel MEMS tunable antenna with wide tuning range of frequency," *Microsystem Technologies*, vol. 21, no. 3, pp. 655-660, March 2015.
- [19] Y. D. Dong, T. Yang, and T. Itoh, "Substrate integrated waveguide loaded by complementary split-ring resonators and its applications to miniaturized waveguide filters," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 57, no. 9, pp. 2211-2222, Sep. 2009.
- [20] S. Sh. Saberhosseini, B. A. Ganji, A. Ghorbani, "Tunable and Dual-Band HMSIW Resonator using RF MEMS Capacitor," *Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, pp. 279-282, May. 2017.
- [21] J. D. Baena, J. Bonache, et al., "Equivalent Circuit Models for Split Ring Resonators and Complementary Split Ring Resonators Coupled to Planar Transmission Lines," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 53, no. 4, pp. 1451-1461, Apr. 2005.
- [2] X. P. Chen, K. Wu and D. Drolet, "Substrate integrated waveguide filter with improved stopband performance for satellite ground terminal," *IEEE Trans. on Microw. Theory and Tech.*, vol. 57, no. 3, pp. 674-683. March 2009.
- [3] X. P. Chen, K. Wu and Z. L. Li, "Dual-band and triple-band Substrate integrated waveguide filter with chebyshev and quasi-elliptic response," *IEEE Trans. on Microw. Theory and Tech.*, vol. 55, no. 12, pp. 2569-2578. December 2007.
- [4] V. Sekar, and K. Entesari, "A half-mode substrate-integrated-waveguide tunable filter using packaged rf mems switches," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 22, no. 7, pp. 336-338, July 2012.
- [5] D. E. Senior, X. Cheng and Y. K. Yoon, "Electrically tunable evanescent mode half-mode substrate-integrated-waveguide resonators," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 22, no. 3, pp. 123-125, March 2012.
- [6] J. Hinojosa J, A. Saura-Ródenas, et al. "Reconfigurable Coplanar Waveguide (CPW) and Half-Mode Substrate Integrated Waveguide (HMSIW) Band-Stop Filters Using a Varactor-Loaded Metamaterial-Inspired Open Resonator," *Materials*. vol. 11, no. 1, pp. 39-55, 2018.
- [7] J. P. Song, X. Y. Wang, F. Wei, X. W. Shi, "Electronically Reconfigurable Varactor-Loaded HMSIW Bandpass Filter," *Frequenz*, vol. 72, no. 5-6, pp. 227-230, 2018.
- [8] Z. D. Wang, F. Wei, L. Zhang and X. Shi, "Compact Reconfigurable HMSIW Bandpass Filter Loaded by CSRR," *Progress In Electromagnetics Research Letters*, vol. 40, pp. 191-200, 2013.
- [9] D. E. Senior, X. Cheng, M. Machado and Y. K. Yoon, "Single and dualband bandpass filters using complementary split ring resonator loaded half mode substrate integrated waveguide," *IEEE Antennas Propag. Symp.*, pp. 1-4, July 2010.
- [10] D. E. Senior, X. Cheng and Y. K. Yoon, "Dual-Band Filters Using Complementary split ring resonator and Capacitive loaded Half-Mode substrate-integrated-waveguide," *IEEE Antennas Propag. Symp.*, pp. 1-2, July 2012.
- [11] H. Kang, J. Song, J. Li, et al. "Compact Dual-band Bandpass Filter Based on HMSIW and DS-CSRR," *Frequenz*, vol. 71, no. 7-8, pp. 323-327, 2016.
- [12] G. M. Rebeiz, "RF MEMS: Theory, Design and Technology," John Wiley & Sons, 2003.
- [13] S. Molaei, B. A. Ganji, "Design and simulation of a novel RF MEMS shunt capacitive switch with low actuation voltage and high isolation," *Microsystem Technologies*, vol. 23, no. 6, pp. 1907-1912, June 2017.