

طراحی و اتصال عناصر یک سیستم سنسوری دو تشدیدگر موج سطحی برای کار در دمای بالا با استفاده از موجبر هم صفحه

محمد جوادیان صراف^{۱*}، محمد نزاربن همیدون^۲

^۱دانشگاه آزاد اسلامی مشهد، واحد مشهد، گروه برق، مشهد، ایران

^۲دانشگاه پوترا مالزی، گروه برق، مالزی، کوالالامپور

چکیده:

روش‌های اندازه‌گیری بی سیم با استفاده از سیستم‌هایی که نیاز به باتری نداشته باشند، در محیط‌های پر خطر دارای جذابیت بسیاری است. در این مقاله روش طراحی یک سیستم سنسوری با دو تشدیدگر موج سطحی در دمای بالا بررسی شده است. روش طراحی القاگر مارپیچی و خازن اینتردیجیت که در مدار تطبیق امپدانس این سیستم به کار می‌روند، برای کاربردهای دمای بالا معرفی شده است. نحوه اتصال این عناصر در سطح دوم با استفاده از موجبر هم صفحه مورد بررسی قرار گرفته است. پیاده‌سازی این سیستم با استفاده از روش فیلم ضخیم انجام شده و در نهایت نتایج اندازه‌گیری آن تا دمای 410°C ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی:

دمای بالا، تشدیدگر موج سطحی، القاگر مارپیچی، خازن اینتردیجیت، موجبر هم صفحه

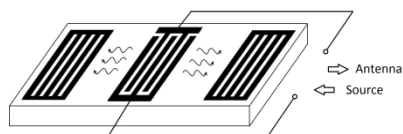
*عده‌دار مکاتبات

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، دانشکده مهندسی، گروه برق، مشهد، ایران

پست الکترونیکی: m.j.sarraf@mshdiau.ac.ir

۱- مقدمه

منشأ این سیگنال جمع‌آوری شده، مقداری انرژی است که بصورت موج مکانیکی در بلور زیربنا ذخیره شده است.



(الف)



(ب)

شکل (۱): تشدیدگر SAW (الف) یک پورت (ب) دو پورت

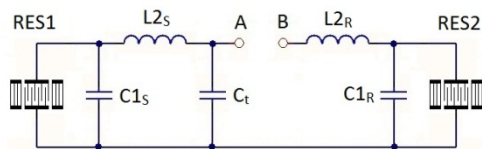
در ساختار ادوات پیزو الکتریک مورد استفاده در دماهای پائین، معمولاً از بلور کوارتز استفاده می‌شود. لیکن به دلیل تغییر فاز α به β ی کوارتز، در دمای 375°C ، استفاده از این بلور به حد دمایی 350°C محدود می‌شود [۳]. بقیه بلورهای مورد استفاده در دمای پائین مانند لیتیم نیوبات و لیتیم تانتالیت هم محدوده دمایی در حد 300°C دارند [۴]. در دماهای بالا در حال حاضر از بلورهای گالیم ارتوفسفات (GaPO_4) یا لانگاسیت استفاده می‌شود. لانگاسیت بلوری است که تا دمای 1475°C دارای تغییر فاز نیست و ماده بسیار مناسبی برای کاربردهای دمای بالا است [۵].

بلور گالیم ارتوفسفات دارای دمای ذوب 1670°C بوده و تا دمای 970°C تغییر فاز ندارد [۵]. این بلور به دلیل نداشتن خاصیت پیروالکتریک [۶]، داشتن بهترین پایداری حرارتی در بین زیربناهای دمای بالا [۷]، نداشتن خاصیت فروالکتریک و در نتیجه نداشتن دمای کوری [۳]، داشتن ضریب کوپلینگ بالاتر که منجر به ساخت قطعات کوچکتر می‌شود [۸]، مقاومت الکتریک بالا [۹] و چندین مزیت

استفاده از ادوات پیزوالکتریک یکی از بهترین روش‌هایی است که برای اندازه‌گیری کمیت‌ها در محیط‌های سخت به کار می‌رود. پایداری حرارتی ضرایب پیزو الکتریک در بازه وسیعی از تغییرات دما مهم‌ترین عامل استفاده از اثر مستقیم پیزوالکتریک در چنین کاربردهایی است [۱]. ادوات موج سطحی (SAW)، مهم‌ترین ادوات پیزو الکتریک هستند که برای کاربردهای دمای بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ادوات به واسطه اندازه کوچک، اتلاف توان پایین، حساسیت کم نسبت به نویزهای الکترو مغناطیس، و بازه وسیع عملکرد دمایشان، ادوات جذابی برای کاربردهای اندازه‌گیری در دماهای بالا و محیط‌های نویزی هستند. ابعاد کوچک و در نتیجه امکان مجتمع سازی آنها با ادوات نیمه هادی از مزایای دیگر این قطعات به شمار می‌رود که باعث شده جای پای خود را در بسیاری از کاربردها باز کنند [۲].

ادوات SAW شامل دو دسته عمده خطوط تأخیر و تشدیدگرها می‌شوند. در شکل (۱) دو نوع تشدیدگر SAW مشاهده می‌شود که به ترتیب (الف) تشدیدگر تک پورت و (ب) تشدیدگر دو پورت هستند. ساختار این تشدیدگرها شامل یک زیربنای پیزو الکتریک و یک لایه فلزی است. لایه فلزی مبدل اینتردیجیت و انعکاس دهنده‌های قطعه را تشکیل می‌دهد. مبدل اینتردیجیت می‌تواند سیگنال الکتریکی را به موج مکانیکی و یا برعکس تبدیل کند. در تشدیدگر دو پورت سیگنال الکتریکی از یک پورت وارد شده و پس از تبدیل به موج مکانیکی با فرکانس مشخصه زیربنا، از طریق مبدل دوم مجدداً به سیگنال الکتریکی با همان فرکانس تبدیل شده و از قطعه خارج می‌شود. در تشدیدگر تک پورت سیگنال از تک پورت موجود وارد و پس از مدت کوتاهی از همان پورت جمع‌آوری می‌شود.

امکان را فراهم می کند که هر دو قسمت مدار به طور جداگانه بهینه سازی شوند. سیستم دو تشدیدگر موج سطحی از جمله این گونه روش ها است که استفاده از آن در دمای پائین به طور کامل مورد ارزیابی قرار گرفته است [۱۲] و [۱۳]. در این کار از این سیستم برای کار در دمای بالا استفاده شده است. به این منظور ابتدا تشدیدگر SAW برای کار در دمای بالا طراحی و ساخته شده و سپس مدار تطبیق آن طراحی شده است. قطعات این مدار تطبیق با استفاده از عناصر پسیو مسطح پیاده سازی، و مجموعه این مدار بر روی یک زیربنای مناسب برای کار در دمای بالا پیاده شده است. در این کار از القاگر مارپیچی و خازن اینتردیجیت به دلیل مسطح بودن کامل آنها، استفاده شده است. برای اتصال عناصر به یکدیگر و همچنین به وسایل اندازه گیری از موجبر هم صفحه (CPW) استفاده شده است.



شکل (۲): مدار تطبیق Π -CLC برای دو تشدیدگر موج سطحی

در ادامه ابتدا سیستم دو تشدیدگر موج سطحی مورد بررسی قرار می گیرد. سپس نحوه طراحی مدار تطبیق آن مرور می شود. آنگاه عناصر پسیو سطحی مورد استفاده در این کار یعنی القاگر مارپیچی و خازن اینتردیجیت مورد بررسی قرار گرفته و روش طراحی آنها ارائه می شود. سپس نحوه استفاده از موجبر هم صفحه عنوان می شود. در نهایت، پیاده سازی کل مدار و نتایج اندازه گیری در دمای بالا ارائه می گردد.

دیگر به عنوان ماده پیزو الکترونیک زیربنا در این کار مورد استفاده قرار گرفته است.

در کاربردهای دمای بالا به عنوان لایه فلزی می توان از فلزاتی مانند مولیبدن (Mo)، تنگستن (W)، طلا (Au)، پالادیم (Pd)، پلاتینیوم (Pt)، رودیم (Rh)، روتنیم (Ru)، و ایریدیوم (Ir) استفاده کرد. هرچند پلاتین نسبت به طلا و بقیه فلزات فوق، دارای مقاومت ویژه بالاتری است، اما به دلیل پایداری حرارتی بالاتر آن نسبت به طلا [۱۰]، دمای ذوب بالاتر آن (1768°C) و مقاومت شیمیایی آن، نسبت به بقیه این فلزات برتری دارد [۵] و در این کار از آن استفاده شده است.

هرچند پلاتین فلز مناسبی برای دماهای بالا است، ولی چسبندگی آن به موادی مانند گالیم ارتوفسفات و لانگاسیت مناسب نیست [۵]. از این رو باید یک فلز زیرلایه برای تأمین چسبندگی مناسب بین این دو قرار داد. مطالعات نشان می دهد که تانتالیم (Ta)، زیرکونیم (Zr)، و تیتانیوم (Ti) فلزات مناسبی برای این منظور هستند [۱۱]. در این طرح از زیرکونیم به عنوان فلز زیرلایه استفاده شده است.

در کاربردهای سنسوری به دو روش از ادوات پیزو الکترونیک استفاده می شود. در روش اول سطح بلور را در معرض کمیت مورد اندازه گیری قرار می دهیم و با استفاده از اینترفیس مناسب آن را بار می کنیم. اثر این بار بر بلور، باعث تغییر مشخصه فرکانسی آن، متناسب با کمیت مورد اندازه گیری می شود.

در روش دوم تشدیدگر پیزو الکترونیک به عنوان عنصر حس کننده کمیت مورد نظر به کار نمی رود. در این روش تشدیدگر در مداری قرار دارد که فرکانس تشدید آن علاوه بر تشدیدگر، تابع مقدار عناصر پسیو دیگر، مانند یک سنسور خازنی یا القایی است. در چنین کاربردهایی جداسازی تشدیدگر پیزو الکترونیک از عنصر حسگر، این

۲- سیستم دو تشدیدگر موج سطحی

سیستم دو تشدیدگر موج سطحی، یک سیستم سنسوری است که برای کاهش اثر کانالهای رادیویی و همچنین جدا کردن عضو حس کننده از ادوات موج سطحی و قرار دادن آن در شبکه تطبیق ارائه شده است [۱۲]. این جداسازی امکان بهینه سازی هر قسمت را به طور جداگانه فراهم می کند.

باف و همکارانش روش اندازه گیری تفاضلی را بر روی سیستم های بی سیم SAW اعمال کردند. در این سیستم از دو تشدیدگر SAW به همراه دو مدار تطبیق امپدانس استفاده می شود. مدارهای تطبیق امپدانس می توانند به صورت دو عنصری، سه عنصری و یا چند عنصری پیاده سازی شوند. هرچه تعداد عناصر مدار تطبیق بیشتر باشد، انعطاف پذیری بیشتری در تطبیق در اختیار است، ولی در عوض مدار پیچیده تر و پیاده سازی آن بخصوص در دماهای بالا و به صورت بی سیم مشکل تر است. بر این اساس معمولاً از مدارهای تطبیق دو عنصری یا سه عنصری برای این منظور استفاده می شود. مدار تطبیق دو عنصری به صورت LC یا CL سری پیاده سازی می شود. مدار تطبیق سه عنصری به صورت T-CLL، PI-CLL، PI-CLC و T-CLC پیاده سازی می شود. این نوع مدارهای تطبیق در ازای افزایش تعداد عناصر مدار نسبت به مدارهای تطبیق دو عنصری، خطی تر و دارای حساسیت بیشتری هستند [۱۴].

۳- طراحی مدار تطبیق

در این سیستم از دو تشدیدگر SAW، یکی با فرکانس تشدید 434 MHz و دیگری با فرکانس تشدید 441.3 MHz استفاده می شود. این تشدیدگرها برای کار در دمای بالا طراحی و ساخته شده اند. زیربنای مورد استفاده برای این

تشدیدگرها گالیم ارتوفسفات (GaPO₄) با برش ۵ درجه بوده و به عنوان لایه فلزی از پلاتین (Pt) استفاده شده است. سیستم دو تشدیدگر موج سطحی طبق شکل (۲) با استفاده از یک مدار تطبیق PI-CLC پیاده سازی شده است. مدار تطبیق PI-CLC نسبت به دیگر مدارهای تطبیق مرسوم، خطی تر و دارای حساسیت بیشتری می باشد [۱۴]. در شکل (۲) اندیس R نشانگر واژه "Reference" و اندیس S نشانگر واژه "Sensor" است.

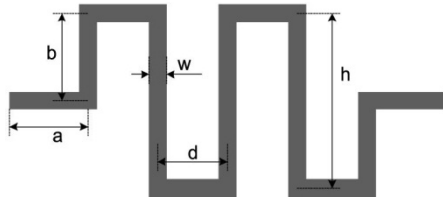
مقادیر C₁ و L₂ در این سیستم باید برای داشتن بهترین حالت تطبیق محاسبه شوند. مقدار C₁ از معادله زیر به دست می آید:

$$C_1 = \frac{C_m}{\sqrt{\frac{50R_m C_m}{L_m}}} - C_0 \quad (1)$$

که در این معادله C_m، R_m، L_m و C₀ پارامترهای مدار معادل تشدیدگر SAW هستند. مقدار L₂ ها از رابطه (۲) به دست می آید.

$$\begin{cases} X_2 = \frac{\max(\text{imag}(z_1)) + \min(\text{imag}(z_1))}{2} \\ L_2 = -\frac{X_2}{2\pi f_p}, X_2 < 0 \end{cases} \quad (2)$$

در این معادله Z₁ امپدانس ترکیب موازی تشدیدگر و خازن C₁ است و f_p فرکانسی است که در آن Z₁ دارای بیشترین مقدار حقیقی است [۱۴]. در این کار براساس روابط (۱) و (۲) برنامه ای تحت نرم افزار MATLAB نوشته شد تا با استفاده از نتایج اندازه گیری پارامترهای S دو تشدیدگر RES1 و RES2، فرآیند تطبیق امپدانس انجام شود. نتیجه این محاسبات به این شرح است:



شکل (۳): القاگر مارپیچی

RES1: $C1_S = 5,99 \text{ pF}$ & $L2_S = 18,39 \text{ nH}$
 RES2: $C1_R = 4,37 \text{ pF}$ & $L2_R = 16,86 \text{ nH}$

این قطعات بایستی بر روی یک زیربنای مشترک بصورت سطحی پیاده‌سازی شوند. به این منظور از القاگر مارپیچی و خازن اینتردیجیت برای پیاده‌سازی قطعات فوق استفاده می‌شود. از یک موجبر هم‌صفحه نیز برای اتصال قطعات به کانکتورهای خروجی استفاده می‌شود.

۴- طراحی عناصر پسیو

در این قسمت به تشریح روش طراحی عناصر پسیو برای کار در دمای بالا پرداخته شده است. این قسمت شامل روش طراحی القاگر مارپیچی^۱، روش طراحی خازن اینتردیجیت و همچنین موجبر هم‌صفحه است.

۴-۱- طراحی القاگر مارپیچی

در هنگام پیاده‌سازی یک برد برای کاربردهای دمای بالا، مسطح بودن ادوات بسیار حائز اهمیت است. معمولاً زیربناهایی که برای پیاده‌سازی چنین مدارهایی استفاده می‌شود، مانند آلومینا دارای سختی بالا بوده و امکان سوراخ کاری روی آنها به سهولت فراهم نیست. استفاده از القاگر مارپیچی به دلیل مسطح بودن واقعی آن و عدم نیاز به سوراخ کردن برد زیر بنا یا استفاده از پل هوایی، پیاده‌سازی چنین مدارهایی را ساده‌تر می‌کند. یکی دیگر از مزایای این نوع القاگر، کمتر بودن کوپلینگ آن با بقیه ادوات مدار است [۱۵].

یک القاگر مارپیچی نوعی در شکل (۳) نشان داده شده که مطالعات مناسبی روی تحلیل این نوع القاگر انجام شده است. در اولین تلاش‌ها رولی [۱۶] مبانی محاسبه ضریب خود القای جزئی، ضریب القای متقابل جزئی و ضریب القای کل یک القاگر با مقطع مربعی را ارائه نمود. سپس آکونا [۱۷] روش طراحی یک القاگر مارپیچی را روی یک برد مدار چاپی دو لایه بررسی نمود. وی یک مدل مداری شامل یک شاخه RL سری، موازی با یک ترکیب موازی RC را به عنوان مدل مداری یک القاگر مارپیچ پیشنهاد نمود و روابط بین پارامترهای این مدل و ابعاد فیزیکی القاگر مارپیچ را ارائه نمود. روش پیشنهادی آکونا برای طراحی القاگرهایی در بازه ۸ الی ۵۰ نانو هانری و در بازه فرکانسی ۳۰ الی ۱۰۰۰ مگاهرتز با دقت ۵ درصد کارایی داشت.

استوجناویک [۱۵] یک روش نوین برای محاسبه مقدار ضریب القای یک القاگر مارپیچی معرفی کرد [۱۸]. او با استفاده از روش‌های برازش مناسب، و براساس داده‌های به دست آمده از روش محاسبه ضریب القا که توسط گروور و گرین هاوس [۱۹] ارائه شده بود، یک معادله تک جمله‌ای برای محاسبه ضریب القای القاگر به دست آورد. تک جمله‌ای ارائه شده توسط استوجناویک مقدار ضریب القا را به فرم زیر می‌دهد:

$$L_{mon} = 0,00266 a^{0,0603} h^{0,4429} N^{0,954} d^{0,606} w^{-0,173} \quad (۳)$$

¹ Meander line inductor

پارامترهای a ، h ، N ، d و w در شکل (۳) نشان داده شده‌اند. معادله استوچناویک روشی سریع را برای تخمین مقدار ضریب القا بر حسب ابعاد فیزیکی القاگرها ارائه می‌کند.

در این کار برای آن که طرح نهایی دارای دقت بالایی باشد، ابتدا از معادله (۳) برای تخمین زدن اولیه ابعاد القاگر مورد نیاز استفاده شده است. سپس با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده مقدار دقیق ابعاد القاگر مورد نیاز محاسبه شده است. ابتدا روش تخمین با استفاده از معادله (۳) را شرح می‌دهیم و سپس نحوه تعیین دقیق پارامترها را از روی مقادیر اندازه‌گیری شده را بیان می‌کنیم.

شکل (۴) مشخصه امپدانس یک القاگر مارپیچی نوعی را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است، مشخصه امپدانس این القاگر دارای یک فرکانس تشدید است. به ازای فرکانس‌های پائین‌تر از فرکانس تشدید، القاگر مارپیچی رفتار القایی و به ازای فرکانس‌های بالاتر از فرکانس تشدید، این عنصر رفتار خازنی از خود نشان می‌دهد. هر چه فرکانس کاری از فرکانس تشدید کمتر باشد، رفتار القاگر مارپیچی بیشتر به یک القاگر ایده‌آل نزدیک می‌شود؛ لذا در این کار سعی شده است از طرحی استفاده شود که در آن فرکانس تشدید تا حد امکان از فرکانس کار دور باشد.

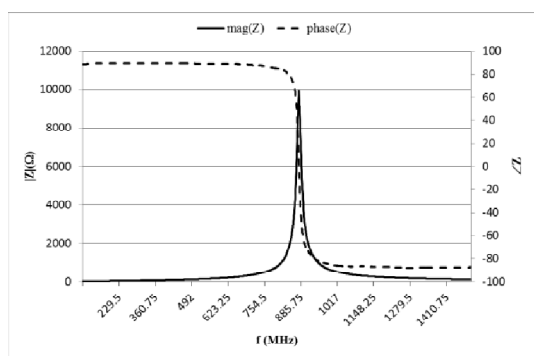
در مجموع، اصول زیر را برای طراحی القاگر مارپیچی پیشنهاد می‌کنیم:

۱- به منظور افزایش ضریب کیفیت و کاهش خازن‌های پارازیتی، القاگر را تا حد امکان از صفحات زمین دور قرار دهید.

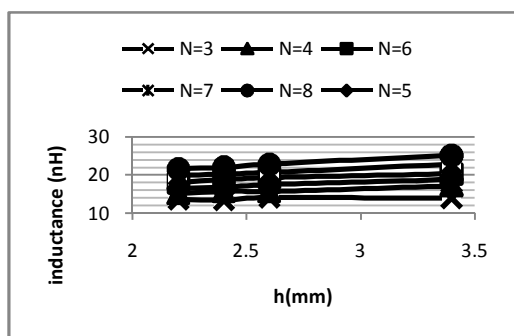
۲- مقدار h را تا حد امکان کوچک نگه دارید، این کار باعث کاهش خازن‌های پارازیتی می‌شود.

۳- مقدار w را تا حد امکان کوچک کنید. این کار باعث افزایش ضریب القا می‌شود. حد پائین مقدار w را تکنولوژی چاپ تعیین می‌کند. در این کار چون از روش فیلم ضخیم استفاده شده است، مقدار کمینه w را به $400\mu\text{m}$ محدود کرده‌ایم تا خطای ناشی از چاپ را به حداقل برسانیم.

۴- کوچک بودن مقدار d باعث کاهش پراش می‌شود [۱۷]، و در عین حال مقدار خازن‌های پارازیتی را افزایش می‌دهد. بنابراین با $w=400\mu\text{m}$ ، یک مقدار متوسط در حد $900\mu\text{m}$ برای d پیشنهاد می‌شود.



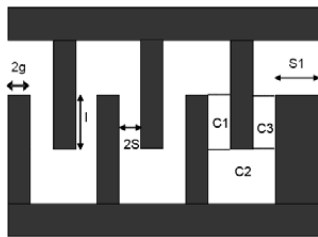
شکل (۴): امپدانس یک القاگر مارپیچی نوعی با $N = 8$ ، $h = 560\text{mil}$ ، $W = 20\text{mil}$ ، $d = 35\text{mil}$



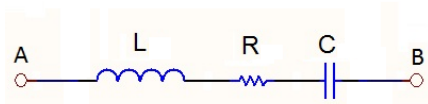
شکل (۵): ضریب القای اندازه‌گیری شده القاگر مارپیچی با $w=400\mu\text{m}$ و $d=1000\mu\text{m}$ بر حسب h .

۵- با داشتن مقادیر w و d می‌توان بقیه پارامترها را از روی معادله (۳) تعیین کرد.

میکرواستریپ، خازن دارای صفحه زمینی است که در سمت دیگر زیر بنا با آن موازی است. به چنین خازن‌هایی زمین شده می‌گویند. در این کار از خازن زمین نشده استفاده شده است. در چنین خازن‌هایی زیر بنا با صفحه زمین ختم نمی‌شود؛ بنابراین به صورت یک دی‌الکتریک بی‌پایان در نظر گرفته شده و برای آن گذردهی نسبی مؤثر ϵ_{eff} را می‌توان برحسب گذردهی نسبی ϵ_r چنین بیان کرد [۲۰]:



(الف)



(ب)

شکل (۶): (الف) ساختار خازن اینتردیجیت (ب) مدار معادل خازن اینتردیجیت [۲۰]

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \quad (۸)$$

مقدار ظرفیت چنین خازنی را می‌توان از رابطه ذیل بدست آورد:

$$C = (N - 3)C_1 + (N - 1)C_2 + 2C_3 \quad (۹)$$

که در آن N تعداد انگشت‌ها و:

برای داشتن خطای کمتر مقدار w برابر $400 \mu m$ و مقدار d برابر $1000 \mu m$ در نظر گرفته شده. سپس به ازای تعداد دورهای $8, 7, 6, 5, 4$ و $N=3$ و مقادیر مختلف h مقدار ضریب القا اندازه گیری شد. شکل (۵) منحنی مقدار ضریب القای اندازه گیری شده را نشان می‌دهد. با استفاده از این منحنی‌ها می‌توان یک رابطه بین مقدار ضریب القا و طول خط‌ها پیدا کرد و با استفاده از آن مقدار دقیق طول خط را برای داشتن یک ضریب القای معین محاسبه نمود. تقریب خطی منحنی مربوط به $N=5$ هست:

$$L = 2,539h + 10,805 \quad (۴)$$

با استفاده از این تقریب می‌توان مقدار h را برای داشتن ضریب القای $L=16/86nH$ به دست آورد:

$$h = \frac{16,86 - 10,805}{2,539} = 2,385 \text{ mm} \quad (۵)$$

به طور مشابه برای $N=6$ تقریب خطی منحنی عبارت است از:

$$L = 3,1783h + 11,078 \quad (۶)$$

و مقدار h متناظر با $L=18/394nH$ برابر است با

$$h = \frac{18,394 - 11,078}{3,1783} = 2,3 \text{ mm} \quad (۷)$$

۲-۴- طراحی خازن اینتردیجیت

شکل (۶) ساختار و مدار معادل یک خازن اینتردیجیت نوعی را نشان می‌دهد. در سیستم‌های مبتنی بر

اگر فرکانس تشدید به قدر کافی از فرکانس کار دور باشد، اندازه امپدانس را می توان از رابطه ذیل محاسبه کرد:

$$|Z_{IDC}| = \sqrt{R^2 + \frac{1}{(2\pi fC)^2}} \quad (14)$$

که نشان می دهد با انتخاب عرض انگشت بزرگ در این خازن ها مقاومت پارازیتی R به میزان قابل قبولی کاهش یافته و می توان IDC را کاملاً با یک خازن معادل سازی کرد. این انتخاب با توجه به بند ۳ از پیشنهادهای طراحی القاگر ماریچی، باعث کاهش ضریب القای پارازیتی شده و بر اساس معادله (۱۳) فرکانس تشدید را به سمت فرکانس های بالاتر سوق می دهد. بزرگتر انتخاب کردن مقدار عرض انگشت همچنین خطای چاپ را کاهش می دهد. بنابراین مقدار عرض انگشت ها در این کار 1mm انتخاب شده است. همچنین برای کاهش پراش مقدار فاصله بین انگشت ها را ۰/۴ mm انتخاب نموده ایم.

در این کار برای داشتن دقت بالاتر در طراحی IDC ابتدا ۱۸۰ خازن IDC با مشخصات بالا و در محدوده ظرفیت های مورد نیاز ساخته و سپس با برون یابی مقدار دقیق طول انگشت ها محاسبه شد. این خازن ها بر روی زیربنای FR۴ استاندارد با ضخامت ۱/۵mm ساخته شد؛ لذا بایستی با توجه به این که زیربنای دمای بالا، آلومینا با ضخامت ۱mm است و دارای گذردهی نسبی متفاوتی با زیربنای FR۴ می باشد، اصلاح مناسب روی آن اعمال شود. معادله (۱۰) نشان می دهد که کلیه اجزاء ظرفیت خازن به ϵ_{eff} وابسته هستند. بنابراین اثر گذردهی نسبی را می توان با استفاده از معادله ذیل اعمال نمود:

$$C_2 = \frac{\epsilon_{r2} + 1}{\epsilon_{r1} + 1} C_1 \quad (15)$$

$$\begin{cases} C_1 = \epsilon_0 \epsilon_{eff} \frac{K(k'_{01})}{K(k_{01})} l \\ C_2 = 2\epsilon_0 \epsilon_{eff} \frac{K(k_{01})}{K(k'_{01})} l_{ext} \\ C_3 = 4\epsilon_0 \epsilon_{eff} \frac{K(k'_{02})}{K(k_{02})} l \end{cases} \quad (10)$$

که در آن $K(k)$ انتگرال هذلولی کامل نوع اول است و

$$k_{01} = \sqrt{1 - \left(\frac{g}{g+s}\right)^2} \quad (11)$$

$$k_{02} = \sqrt{\frac{S1 \times s}{(2g+s)(2g+S1)}}$$

$$l_{ext} \approx l/4$$

همانطور که شکل ۶ (ب) نشان می دهد، مشخصه فرکانسی یک IDC مشابه یک مدار RLC سری است و دارای یک فرکانس تشدید می باشد. مقدار مقاومت پارازیتی آن؛ R، از رابطه ذیل به دست می آید [۲۱]:

$$R = \frac{4}{3} \frac{l}{wN} R_s \quad (12)$$

که R_s مقاومت ورقه ای برحسب اهم بر مربع هادی به کار رفته در خازن است. فرکانس تشدید از رابطه ذیل محاسبه می شود:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (13)$$

معادلات برای دستیابی به موجبر هم صفحه‌ای با امپدانس

مشخصه Z_0 سازمان یافته اند. اگر $Z_0 < \frac{\eta_0}{\sqrt{2(\epsilon_r+1)}}$ باشد:

(۱۸)

و اگر $Z_0 \geq \frac{\eta_0}{\sqrt{2(\epsilon_r+1)}}$ باشد، مقدار G از رابطه ذیل به دست می‌آید:

$$G = 0,0178 \cdot \left\{ \left(\frac{\eta_0}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r + 1}} \right)^2 \cdot B \right\}^{2,4391} \quad (19)$$

که در این روابط $\eta_0 = 120\pi\Omega$ امپدانس ذاتی فضای آزاد است و:

$$A = \frac{0,2584 \cdot \eta_0}{Z_0 \cdot \sqrt{\epsilon_r + 1}} \left[1 + \exp \left(\frac{\epsilon_r}{\epsilon_r + 1} \cdot \sqrt{\frac{0,375 \cdot S}{H}} \right) \right]$$

$$B = 1 + \exp \left(\frac{0,1 \cdot S \cdot Z_0}{H \cdot \eta_0 \cdot \epsilon_r} \right)$$

و $\epsilon_r = 9,8$ ضریب گذردهی نسبی زیربنا (آلومینا) است. برای کاهش تلفات، ضخامت لایه فلزی t ، در فرکانس کار باید از عمق پوستی بیشتر باشد. عمق پوستی را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

که در آن C_1 ظرفیت یک IDC بر روی زیربنا ۱ با گذردهی نسبی ϵ_{r1} و C_2 ظرفیت همان IDC بر روی زیربنا ۲ با گذردهی نسبی ϵ_{r2} است. برای FR۴ گذردهی نسبی $\epsilon_{r1} = 4/6$ و برای آلومینا گذردهی نسبی $\epsilon_{r2} = 9/8$ است. بنابراین ضریب اصلاحی در معادله (۱۵) برابر $\frac{10/8}{5/6} \cong 1,93$ است. داده‌های اصلاح شده ظرفیت خازن‌ها برای $N=7$ و $N=9$ به ترتیب در شکل (۷ الف) و (ب) نشان داده شده است. تخمین خطی هر منحنی نیز در شکل‌ها مشخص شده است. برای خازن $C_{1R}=4/374pF$ با توجه به شکل (۷ الف) مقدار طول انگشت‌ها برابر است با:

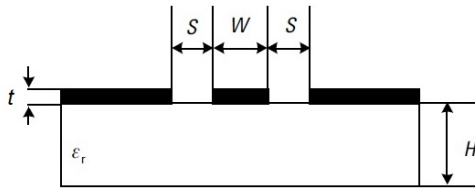
$$l = \frac{4,374 - 3,5707}{0,4046} \cong 1,99mm \quad (16)$$

یا $2mm$ برای خازن $C_{1S}=5/99pF$ با استفاده از شکل (۷ ب) داریم:

$$l = \frac{5,99 - 3,719}{0,5889} \cong 3,86 mm \quad (17)$$

۳-۴- طراحی موجبر هم صفحه

برای اتصال مدار به کانکتورهای دستگاه‌های اندازه‌گیری و بقیه قسمت‌های مدار از موجبر هم صفحه استفاده شده است. شکل (۸) یک موجبر هم صفحه زمین نشده را نشان می‌دهد. به عنوان زیربنا از آلومینای ۹۶٪ با ضخامت $1mm$ استفاده شده است. طراحی موجبر هم صفحه با استفاده از نرم افزار MATLAB و بر اساس معادلات (۱۸) و (۱۹) انجام شده است [۲۲]. در این معادلات با دانستن S مقدار $W = S \cdot G(\epsilon_r, H, Z_0, S)$ محاسبه می‌شود. این



شکل (۸): موجبر هم صفحه زمین نشده

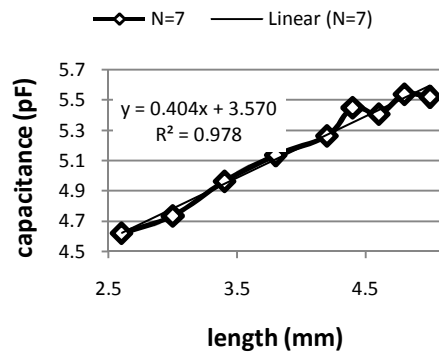
در این کار از یک مش ۱۴۰ با ضریب پرشدگی ۰/۵ استفاده شده است. در چنین مشی ضخامت هر تار در حدود $36\mu\text{m}$ است. بنابراین برای داشتن دقت مناسب مقدار S را حدود ۱۰ برابر این مقدار در نظر می گیریم ($S=15\text{mil}$). به این ترتیب مقدار $W=840/49\mu\text{m}$ به دست می آید. با در نظر گرفتن طول الکتریکی 45° برای این موجبر مقدار طول فیزیکی آن رابطه ذیل قابل محاسبه است:

$$p = \frac{E_l \times c}{360f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (21)$$

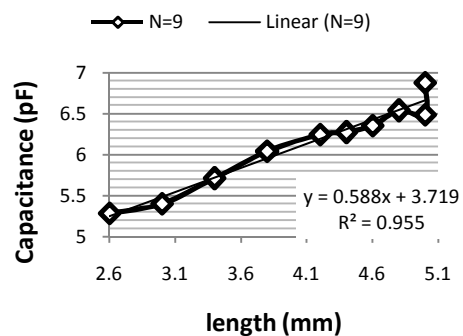
که در آن ϵ_r مقدار مؤثر گذردهی الکتریکی است که از رابطه ذیل به دست می آید [۲۳]:

$$\epsilon_r = \epsilon_{eff} - \frac{0.7(\epsilon_{eff} - 1)t/S}{[K(k_1)/K(k'_1)] + 0.7t/S} \quad (22)$$

که در آن $k_1 = \frac{W}{W+2S}$ و $k'_1 = \sqrt{1 - k_1^2}$ است. با استفاده از مقادیر فوق، طول فیزیکی برابر با $p=39/9\text{mm}$ بدست می آید.



(الف)



(ب)

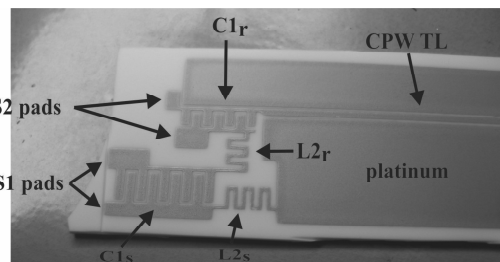
شکل (۷): ظرفیت IDC ها (الف) با $N=7$ (ب) با $N=9$ برحسب طول انگشت (I)

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0 \mu_r}} \quad (m) \quad (20)$$

که در این رابطه ρ مقاومت ویژه لایه فلزی، μ_r $1,000,000,000$ = گذردهی نسبی مغناطیسی آلومینا و $f = 434\text{MHz}$ فرکانس کار است. در این کار از خمیر پلاتین A-5547-ESL برای چاپ لایه فلزی بر روی زیربنا استفاده شده است. مقدار مقاومت ویژه آن براساس داده‌های ورقه اطلاعات آن برابر با 150×10^{-9} است.

۵- پیاده سازی و نتایج اندازه گیری در دمای بالا

برای کار در دمای بالا از خمیر پلاتین ESL-۵۵۷۴-A استفاده شده و با دستگاه چاپ DEK J1۲۰RC مدار طراحی شده با مشخصات فوق روی یک زیربنای آلومینای (۱mm- /۹۶٪) چاپ شده است. شکل (۹) اتصالات سطح دوم یک سیستم دو تشدیدگر SAW را نشان می دهد. این چاپ با استفاده از پروفیل استاندارد این خمیر در کوره HT4-1600-SIC پخته می شود. تشدیدگرهای SAW در محل پدهای مشخص شده روی شکل (۹) با استفاده از خمیر نقره BQ166 چسبانده می شوند و با استفاده از هیت گان GHG-660-LCD بصورت موضعی پخته می شوند.



شکل (۹): پرنیت نهایی سیستم دو تشدیدگر SAW.

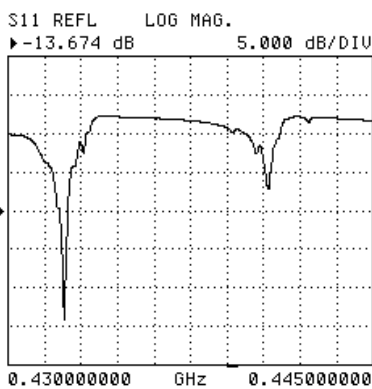
نتیجه اندازه گیری مقدار S11 این سیستم دو تشدیدگر SAW با استفاده از VNA-37247 انریتسو در دمای محیط در شکل (۱۰) نشان داده شده است. شکل (۱۰) نشان می دهد که سیستم دارای دو فرکانس تشدید، یکی در نزدیکی فرکانس تشدید RES1 و دیگری در نزدیکی فرکانس تشدید RES2 است. اختلاف این دو فرکانس تشدید به عنوان خروجی سیستم به حساب می آید.

مقدار S11 برای سیستم دو تشدیدگر SAW در بازه دمایی ۲۵ تا ۴۱۰ درجه سانتیگراد، اندازه گیری شده و از روی آن مقادیر فرکانس تشدید و همچنین اختلاف آنها که خروجی سیستم تلقی می شود، استخراج شده و در شکل

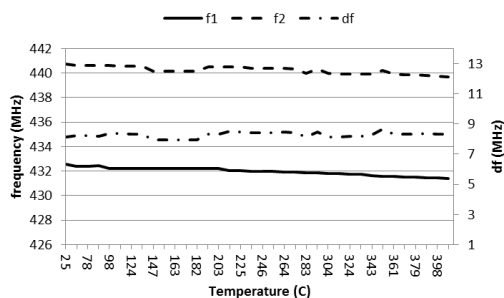
(۱۱) برحسب دما رسم شده است. این شکل نشان می دهد که در این بازه دمایی مقدار Δf تقریباً ثابت است. اندازه گیری نشان می دهد که Δf دارای مقدار متوسط 8.27MHz و انحراف معیار 0.177 است.

۶- نتیجه گیری

اندازه گیری کمیت‌ها در محیط‌های سخت نیازمند سیستم‌هایی است که تا حد امکان دخالت انسان را کم کند. سیستم بی سیم بدون باتری برای چنین کاربردهایی ایده آل است. یک سیستم دو تشدیدگر موج سطحی را می توان به عنوان یک سیستم بی سیم بدون باتری به کار برد.



شکل (۱۰): مقدار S11 سیستم دو تشدیدگر SAW



شکل (۱۱): فرکانس های تشدید و اختلاف آنها در سیستم دو

تشدیدگر SAW

در این مقاله نحوه استفاده از سیستم سنسوری دو تشدیدگر SAW برای کاربردهای دمای بالا تشریح شده

است. در این کار از $GaPO_4$ به عنوان زیربنا و از پلاتینوم به عنوان فلز برای طراحی و ساخت تشدیدگرهای SAW استفاده شده است و زیرکونیوم به عنوان فلز زیرلایه به کار رفته است. روش اتصالها در سطح دوم به طور کامل تشریح و روش طراحی اجزای آن معرفی شده است. در سطح دوم اتصالها از آلومینای ۹۶٪ به عنوان زیربنا و از خمیر پلاتین به عنوان هادی‌های اتصال دهنده قطعات و از موجبر هم‌صفحه برای اتصال قطعات استفاده شده است. آرایش Π -CLC به عنوان مدار تطبیق به کار رفته است. روش طراحی مدار تطبیق بررسی و نحوه محاسبه مقادیر عناصر تطبیق امپدانس تعیین شده است. روش پیاده سازی مدار تطبیق با استفاده از عناصر پسو مسطح معرفی شده است. از القاگر مارپیچی به عنوان القاگر، و از خازن اینتردیجیت برای پیاده‌سازی خازن استفاده شده است. روش طراحی این دو عنصر مسطح برای دمای بالا معرفی شده است. از موجبر هم‌صفحه برای اتصال سطح دو بین قطعات استفاده شده است. یک نمونه از چنین سیستمی ساخته و در بازه دمائی $25^{\circ}C$ تا $410^{\circ}C$ اندازه گیری شد. مشاهدات نشان می‌دهد که در بازه دمائی اخیر سیستم دارای پایداری قابل قبول است. اختلاف فرکانس تشدید دو تشدیدگر که به عنوان خروجی سیستم به حساب می‌آید، دارای مقدار متوسط $8/27MHz$ و انحراف معیار 0,177 است.

انجام تحقیقات در این زمینه هنوز در گام‌های اولیه است و ادامه این تحقیقات می‌تواند منجر به تحولی در زمینه سیستم‌های اندازه‌گیری در محیط‌های سخت شود. بویژه می‌توان ادامه تحقیقات را در زمینه مواد به سمت بررسی خواص مواد در سه لایه مورد استفاده، یعنی زیربنا، فلز و

لایه چسب، متمرکز نمود. در خصوص زیربنا بر روی بهینه کردن فرآیند ساخت بلور $GaPO_4$ کار کرد و خواص این بلور در دماهای بالا را در برش‌های مختلف بررسی نمود. در خصوص عناصر مدار می‌توان به بررسی روش‌های ساخت القاگرها و خازن‌های متغییر در دماهای بالا پرداخت.

در معبود کارهایی که در ساخت سیستم‌های سنسوری در محیط‌های سخت بر مبنای زیربنای $GaPO_4$ یا لانگاسیت، به صورت سیستم DSAWR انجام شده است [۲۴]، از روش سنتی تطبیق استفاده شده و القاگرها با استفاده از سیم پیچ‌های دارای هسته فریتی طراحی و پیاده‌سازی شده‌اند. این روش گرچه به دلیل امکان تغییر مقدار ضریب القای سیم پیچ با تغییر مکان هسته، تطبیق کاملتری را ایجاد می‌کند، اما ابعاد سیستم بزرگتر خواهد بود. سیستم پیشنهادی در اینجا به دلیل مجتمع سازی بر روی یک زیربنای مشترک، کوچکتر و از استحکام بیشتری برخوردار است.

ساخت این سیستم که می‌توان کاربردهای وسیعی را برای آن در محیط‌های سخت مانند پالایشگاه‌ها، مناطق حفاری نفتی، نیروگاه‌های برق، سیستم‌های فضایی و کاربردهای نظامی پیش‌بینی کرد، دارای دو مرحله ساخت تشدیدگر قابل استفاده در دمای بالا، و طراحی مدار سیستم قابل استفاده در دمای بالا است. قسمت دوم به دلیل نیاز به امکانات رشد بلور گالیم ارتوفسفات یا لانگاسیت، برش دادن آن در جهت خاص، و انجام لیتوگرافی پرتوالکترونی، در حال حاضر در ایران قابل پیاده‌سازی نیست؛ اما در صورت ساخت این قسمت در کشورهای دیگر مانند انگلیس یا استرالیا، می‌توان قسمت دوم آن را در ایران با استفاده از تکنولوژی فیلم ضخیم دنبال کرد.

1. Worsch, P.M., P.W. Kreml, and W. Wallnofer, *GaPO₄ "Crystal for Sensor Applications in Sensors"*, 2002. *Proceedings of IEEE* 2002. p 589-593.
2. Reindl, P.D.L., "*Wireless Passive SAW Identification Marks and Sensors*", in *2nd Int. Symp. Acoustic Wave Devices for Future Mobile Communication Systems* 2004. p. 15.
3. Schiopu, P., et al. *Comparative study of GaPO₄, langasite, and LiNbO₃ "properties with application in Surface Acoustic Waves microdevices"*. in *32nd International Spring Seminar on Electronics Technology*. 2009
4. Fachberger, R., et al., *Applicability of LiNbO₃, langasite and GaPO₄ "in high temperature SAW sensors operating at radio frequencies"*. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2004.51(11): p.1431-1427.
5. Aubert, T., O. Elmazria, and M.B. Assouar. "*Wireless and batteryless surface acoustic wave sensors for high temperature environments*". in *9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments*. 2009.
6. Beaucage, T.R., "*High temperature LGT expansion measurements through multiple techniques*", in *Electrical and Computer Engineering* 2007, B.S. University of Maine: United States.
7. Le Traon, O., et al., *LGS and GaPO₄ "piezoelectric crystals: New results. Solid State Sciences"*, 2010. 12(3): p. 324-318.
8. Krispel, F., et al. "*Properties and applications of singly rotated GaPO₄ resonators*". in *Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition Jointly with the 17th European Frequency and Time Forum*. 2003.
9. Kreml, P., G. Schleinzer, and W. Wallnofer, *Gallium phosphate, GaPO₄ "a new piezoelectric crystal material for high-temperature sensorics"*. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1997. 61(3-1): p.: 363-361.
10. Mrosk, J.W., et al., *Materials Issues of SAW Sensors for High-Temperature Applications*. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 2001. 48(2).
11. Hamidon, M.N., et al., "*Fabrication of high temperature surface acoustic wave devices for sensor applications*". *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005. 124-123: [407-403.
12. Binhack, M., et al. "*A combination of SAW-resonators and conventional sensing elements for wireless passive remote sensing*". in *Ultrasonics Symposium, IEEE*. 2000.
13. Binhack, M., et al. "*Modeling of double SAW resonator remote sensor*". in *IEEE Symposium on Ultrasonics*. 2003.
14. Qiuyun, F., et al. "*Progress of matching network for passive remote hybrid sensor based on SAW resonator*". in *IEEE Ultrasonics Symposium*. 2008.
15. Stojanovic, G., L.Z. Ivanov, and M. Damjanovic, "*Novel efficient methods for inductance calculation of meander inductor*". *COMPEL*, 2006. 25(4): p. 928-916.
16. Ruehli, A.E., "*Inductance calculations in a complex integrated circuit environment*". *IBM J. Res. Develop.*, 1972: p. 470(481).
17. Acuna, J.E., J.L. Rodriguez, and F. Obelleiro, "*Design of Meander Line Inductors on Printed Circuit Boards*". *Int. J. RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2001. 11: p. 219-230.
18. Sarraf, M.J., et al., "*Interfacing SAW Resonators for Wireless High Temperature Applications. Sensors & Transducers Journal*", 2011. 130(7): p. 22-11.
19. Greenhouse, H., "*Design of Planar Rectangular Microelectronic Inductors*". *IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging*, 1974. 10(2): p. 109-101.
20. Ajayan, K.R. and K.J. Vinoy, "*Planar Inter Digital Capacitors on Printed Circuit Board*".

21. Bahl, I., "*Lumped Elements for RF and Microwave Circuits*". 2003.
22. Yildiz, C. and M. Turkmen, *New and very simple CAD models for coplanar waveguide synthesis*. Microwave and Optical Technology Letters, 2004. 41(1): p.53-49.
23. Gupta, K.C ,*Microstrip lines and slotlines* 1996, Boston: Artech House, Inc.
24. GIRD-CT- 00541-2001, *WIRGON Progress report*, 2004.