

طراحی، شبیه‌سازی و ساخت سوئیچ خازنی RF MEMS بر روی بستر آلومینا

سعید دل‌آرام فریمانی^۱ مجید رضا علی‌احمدی^۴ علیرضا عرفانیان^۳ حسن حاج قاسم^۲

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده برق و الکترونیک-دانشگاه صنعتی مالک اشتر- تهران- ایران

Saeed_delaram_mut@yahoo.com

۲- دانشیار- دانشکده علوم و فنون نوین - دانشگاه تهران- تهران- ایران

Hhajghassem@yahoo.com

۳- استادیار- دانشکده برق و الکترونیک -دانشگاه صنعتی مالک اشتر- تهران- ایران

Erfanian@mut.ac.ir

۴- مری- دانشکده برق و الکترونیک -دانشگاه صنعتی مالک اشتر- تهران- ایران

MR_aliahmadi@yahoo.com

چکیده: در این مقاله طراحی، شبیه‌سازی و ساخت یک سوئیچ خازنی RF MEMS موازی کم تلف بروی موجبر هم‌صفحه و بستر عایق آلومینا، در باند فرکانس ۴۰-۶۰ GHz ارائه شده است. مکانیزم تحریک این سوئیچ بصورت الکترواستاتیکی است. ابتدا موجبر هم‌صفحه برای داشتن امپدانس مشخصه 5Ω بروی بستر عایق آلومینا طراحی شده، سپس سوئیچ مورد نظر طراحی و پس از انتخاب ابعاد آن، پارامترهای مهم آن توسط شبیه‌سازی المان محدود و موجی کامل با نرم افزارهای CoventorWare و HFSS بدست آمده است. در این مقاله نشان داده شده که سوئیچ طراحی شده دارای عملکرد مناسبی در این باند فرکانسی است، بطوریکه ولتاژ پایین کشندۀ $25V/25V$ ، تلفات داخلی $8dB/8dB$ ، تلفات بازگشتی بیشتر از $9/8dB$ و مقدار ایزولاسیون نیز $50dB$ حاصل شده است. با توجه به ابعاد طراحی شده، نمونه آزمایشگاهی سوئیچ بروی بستر آلومینا ساخته شده که بر اساس اندازه‌گیری‌های صورت گرفته، مقدار تلفات داخلی $5dB/5dB$ و تلفات بازگشتی بیشتر از $10dB$ حاصل شده است.

کلمات کلیدی: سوئیچ RF MEMS، موجبر هم‌صفحه، تحریک الکترواستاتیکی، تلفات داخلی، ایزولاسیون

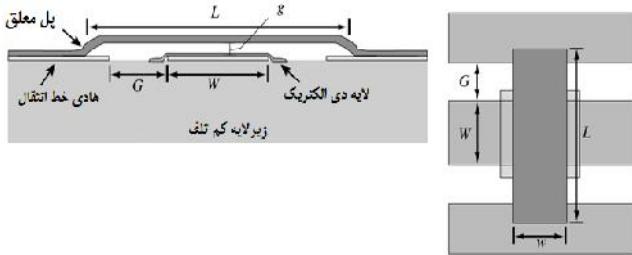
تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۱/۹/۷

تاریخ پذیرش مشروط : ۱۳۹۳/۳/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۳/۷/۱۹

نام نویسنده مسئول: سعید دل‌آرام فریمانی

نشانی نویسنده مسئول: تهران، لوزان، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، دانشکده برق و الکترونیک، صندوق پستی: ۱۷۷۴-۱۷۷۵-۱۵۸۷۵



شکل (۱): شماتیک یک سوئیچ RF MEMS

روش‌های مختلفی برای بررسی این ساختار وجود دارد. در مرجع [۳] مدل پارامتری عناصر فشرده برای یک سوئیچ خازنی، بر پایه تحلیل موجی کامل با شبیه ساز HFSS و با شرایط مرزی تشعشعی و هادی کامل ارائه شده است. بدست آوردن مقدار عناصر فشرده تشکیل دهنده سوئیچ و استخراج پارامترهای S با روش‌های عددی نیز در منبع [۴] بیان شده است. اما در اینجا پارامترهای RF مورد نظر با استفاده از شبیه سازی موجی کامل توسط نرم افزار HFSS ارائه گردیده است. از شبیه سازی المان محدود توسط نرم افزار CoventorWare نیز برای بدست آوردن

پارامترهای مکانیکی سوئیچ مورد نظر استفاده شده است.

نوعاً از سیلیکون با مقاومت بالا بعنوان بستر کم تلف استفاده می‌شود [۵]. در مرجع [۶]، پارامترهای سوئیچ بروی بستر سیلیکون مقاومت بالا، سیلیکون متخلخل و کوارتز با یکدیگر مقایسه شده است. اما در تحقیق از بستر عایق آلومنیا استفاده شده است. در این مقاله ابتدا یک موجبر هم صفحه با امپدانس مشخصه ۵۰ اهم طراحی شده، سپس یک سوئیچ MEMS بر روی موجبر هم صفحه طراحی گردیده و تحلیل‌های الکترومکانیکی، گذرا و موجی آن توسط نرم افزارهای CoventorWare و HFSS انجام شده است.

۲- موجبر هم صفحه

موجبر هم صفحه یک خط انتقال یک طرفه با سه هادی رسانا بروی یک بستر عایق است. موجبر هم صفحه شامل دو صفحه زمین و یک هادی مرکزی است که در وسط قرار می‌گیرد، همانطورکه در شکل (۲) دیده می‌شود. این موجبرها، اثرات تزویج خازنی را کاهش داده و اجزا اتصال المانها را می‌دهند. موجبرهای هم صفحه بطور عمدۀ برای عناصر مداری و خطوط متصل بهم استفاده می‌شوند.

۱- مقدمه

سوئیچ قطعه‌ای ساده اما ضروری در سیستم‌های مخابراتی، رادار، اندازه گیری و کنترل می‌باشد و بعنوان وسیله‌ای برای برقراری اتصال یا قطع یک مدار الکتریکی تعریف می‌شود. در حالت های مختلف بویژه در فرکانس‌های بالا تحلیل عملکرد سوئیچ مستلزم محاسبات طولانی و پیچیده است. بسته به نوع سوئیچ، توصیف آن مستلزم بررسی مفاهیمی از فیزیک، مکانیک و الکترومغناطیس بطور همزمان می‌باشد. کاربرد سیستم‌های میکروالکترومکانیکی (MEMS) در آرایه‌های فازی آستانه‌های میکرواستریپ و بطور عام در مهندسی آتنن و مایکروویو افزایش چشمگیری داشته و در سال‌های اخیر توجه محققان و مهندسان را به خود معطوف کرده است. در این میان سوئیچ بعنوان بلوك اصلی اهمیت ویژه‌ای دارد. تلفات داخلی پائین؛ ایزولاسیون بالا؛ اعوجاج مدولاسیون داخلی پائین در اثر خاصیت خطی قوی؛ وزن و حجم و هزینه ساخت کم و نیز سازگاری با فناوری MMIC و MIC مزایای عمدۀ این سوئیچ‌ها نسبت به سوئیچ‌های نیمه هادی FET و دیودهای P-I-N می‌باشند. البته سرعت سوئیچینگ پائین و ولتاژ بایاس بالا از جمله معاایب این سوئیچ هاست [۱]. سوئیچ موازی بر روی موجبر هم صفحه (CPW) معروف‌ترین و پرکاربردترین سوئیچ MEMS محسوب می‌شود. ساختمان فیزیکی این نوع سوئیچ در شکل (۱) دیده می‌شود که از یک لایه نازک فلزی بصورت معلق بر روی هادی مرکزی همانند پل که در طرفین به هادی‌های کناری متصل گردیده تشکیل شده است [۲]. بدون ولتاژ بایاس پل با فاصله زیاد از هادی مرکزی قرار داشته و سیگنال توسط خط انتقال می‌یابد. با اعمال ولتاژ بایاس در اثر نیروی الکترواستاتیکی، پل پایین کشیده شده و خازنی بزرگ روی خط سیگنال تشکیل شده که سیگنال ac را بطرف زمین اتصال کوتاه می‌کند. بدین ترتیب حالتهای روشن و خاموش سوئیچ ایجاد می‌گردد. برای جلوگیری از اتصال پل فلزی به خط سیگنال، یک لایه دی الکتریک روی هادی مرکزی خط قرار داده می‌شود. پهنا، فاصله و جنس هادی‌های موجبر هم صفحه و ضخامت و جنس بستر و همچنین جنس، طول، پهنا و ضخامت پل معلق در عملکرد سوئیچ مؤثرند. همچنانکه در شکل (۱) دیده می‌شود، ساختار این سوئیچ از موادی با جنس‌های متفاوت با شرایط مرزی پیچیده تشکیل شده است.

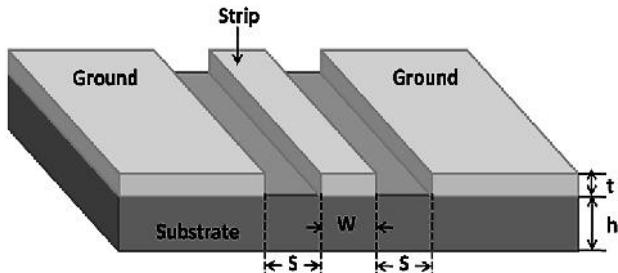
ایجاد تلفات می‌گردد. به همین دلیل، زیرهادی‌های موجبر یک لایه بافر قرار می‌دهند [۹]. بدین ترتیب یک خازن پارازیتی ایجاد شده که در فرکانس‌های بالا خود باعث تلفات می‌شود. پس بهتر است لایه بافر، ثابت دیالکتریک کمتر و ضخامت بیشتری داشته باشد تا بدین ترتیب مقدار این خازن پارازیتی کاهش یابد. اما در اینجا از بستر عایق استفاده شده است، در نتیجه خازن پارازیتی مورد اشاره ایجاد نخواهد شد.

۳- سوئیچ RF MEMS

سوئیچ موردنظر از نوع سوئیچ خازنی است که بصورت موازی در مدار قرار می‌گیرد. این سوئیچ همان‌طور که در شکل (۱) نیز دیده می‌شود روی موجبر هم‌صفحه قرار گرفته و شامل دو الکترود است. الکترود پائین همان خط انتقال مرکزی موجبر هم‌صفحه می‌باشد و الکترود بالایی یک باریکه نازک فلزی است که بصورت معلق بر روی الکترود پایینی قرار گرفته و از طرفین به هادی‌های کناری موجبر هم‌صفحه متصل می‌باشد. یک لایه نازک دیالکتریک نیز جهت جلوگیری از اتصال فلز به فلز، بر روی الکترود پائین پوشانده می‌شود. در اینصورت هم از چسبیدن ناخواسته الکتروودها جلوگیری کرده و هم خازنی تشکیل می‌دهد که موجب عملکرد مناسب سوئیچ در فرکانس‌های بالاتر از 10 GHz می‌شود. باریکه می‌تواند بین دو موقعیت بالا و پایین با اعمال یک ولتاژ تحریک DC تغییر وضعیت دهد. هنگامیکه هیچ ولتاژ تحریکی اعمال نشود، باریکه به شکل یک خازن کوچک پارازیتی ظاهرخواهد شد که در حالت ایده‌آل می‌توان از آن صرف نظر نمود. در اینصورت سوئیچ در حالت روشن قرار دارد (باریکه در موقعیت بالا). با اعمال ولتاژ DC به خط انتقال مرکزی، در اثر نیروی الکترواستاتیکی باریکه به پائین کشیده شده و به لایه دیالکتریک می‌چسبد. در این موقعیت ظرفیت خازنی خیلی زیادی (امپدانس کمی) ایجاد می‌شود. در اینصورت سوئیچ در حالت خاموش قرار دارد (باریکه در موقعیت پایین). با قطع ولتاژ بایاس، در اثر خاصیت کشسانی، باریکه به حالت اولیه باز می‌گردد.

۴- طراحی ابعاد سوئیچ

با درنظر گرفتن ابعاد طراحی شده برای موجبر هم‌صفحه $W=380\text{ }\mu\text{m}$ و $S=380\text{ }\mu\text{m}$ باشد. پس طول باریکه سوئیچ، $L=380\text{ }\mu\text{m}$ انتخاب می‌شود. جنس باریکه از آلومینیوم انتخاب شده، چراکه علاوه بر داشتن رسانندگی الکتریکی مناسب ($\text{s/m}=7.53e7$)، مارژول یانگ نسبتاً پایینی دارد ($E=70\text{ GPa}$). در



شکل (۲): شماتیک موجبر هم‌صفحه

ساختار موجبر هم‌صفحه از مد انتشار شبیه TEM پیروی می‌کند و چندین مزیت نسبت به خطوط میکرواستریپ مرسوم دارد، از جمله: ساخت آسان‌تر؛ پیاده‌سازی آسان قطعات فعال و غیرفعال بصورت موازی؛ کاهش تلفات تابشی و اینکه نیازی به کمربند جانبی و سوراخ‌های اتصالی ندارد [۷].

۴-۱- طراحی موجبر هم‌صفحه

در یک موجبر هم‌صفحه ایده‌آل، ضخامت بستر عایق بینهایت است. البته در عمل این ضخامت باید باندازه کافی بزرگ باشد تا میدان مغناطیسی قبل از آنکه از آن خارج شود، از بین برود. امپدانس مشخصه این موجبر هم‌صفحه از رابطه زیر بدست می‌آید [۸]:

$$Z_0 = \frac{30\pi^2}{\sqrt{(\epsilon_r + 1)/2}} \left| \ln \left(2 \frac{1 + \sqrt{K}}{1 - \sqrt{K}} \right) \right| \quad (1)$$

$$K = \frac{W}{W + 2S} \quad (2)$$

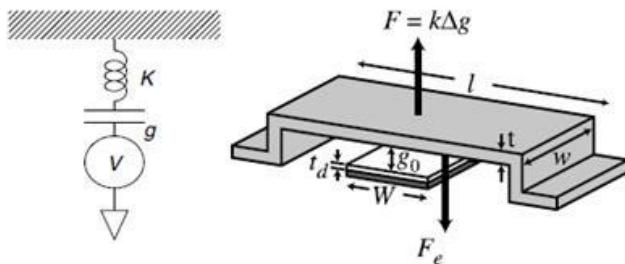
که W عرض خط مرکزی و S عرض شکاف و ϵ_r ضریب دیالکتریک نسبی بستر است. در طراحی موجبر هم‌صفحه، بستر از جنس آلومینا با $\epsilon_r = 9/8$ و $\text{Tangent Loss} = 0.0005$ و $s/m = 500\text{ }\mu\text{m}$ و هادی‌ها از جنس طلا با رسانندگی $1\text{ }\mu\text{m} = t$ است. در اینصورت می‌توان از سونش $4/1e7$ و ضخامت $1\text{ }\mu\text{m}$ از جنس سونش طلا با رسانندگی $1\text{ }\mu\text{m} = t$ است. در اینصورت می‌توان از سونش مرتبط برای سونش لایه دیالکتریک روی هادی مرکزی (اکسید سیلیکون) استفاده کرد، چراکه سونش گر اکسید سیلیکون (با فر هیدروفلوریک اسید) آسیبی به لایه طلا نمی‌رساند. ابعاد موجبر هم‌صفحه برای داشتن بهترین تطبیق امپدانس ($50\text{ }\Omega$) توسط نرم‌افزار HFSS بصورت $W=150\text{ }\mu\text{m}$ و $S=115\text{ }\mu\text{m}$ بدست آمد. در اینصورت موجبر دارای تطبیق امپدانس مناسب در ورودی و خروجی بوده و میزان تلفات خط حداقل خواهد شد. در بسیاری از طراحی‌ها از سیلیکون با مقاومت بالا (ناخالصی کم)، در حدود $5-10\text{ K}\Omega\cdot\text{cm}$ استفاده می‌شود. ولی بدلیل اینکه سیلیکون بستر عایق کامل نیست، در هنگام بایاس dc، جریان‌های نشستی بین خط سیگنال و خط زمین جاری می‌شوند و باعث

جدول (۲): ابعاد سوئیچ طراحی شده

پارامتر	(μm)	اندازه	پارامتر	(μm)	اندازه
h	۵۰۰		W	۱۰۰	
W	۱۵۰		g_0	۳	
S	۱۱۵		T	۱	
L	۳۸۰		t_d	۰.۳	

۲-۳- تحلیل الکترواستاتیکی سوئیچ

یک سوئیچ موازی مطابق با شکل (۳) در نظر بگیرید. این سوئیچ با دو خازن سری و یک فنر که به صورت سری با خازن قرار دارد، مدل می‌شود. با این روش ولتاژ تحریک بر حسب انحراف پل معلق سوئیچ محاسبه شده و ولتاژ پایین کشنده^۳ و ولتاژ پایین نگهدارنده^۴ بدست می‌آید. در معادلات ارائه شده عرض پل و w عرض $A=w \cdot W$ ، مساحت الکترود است که W عرض پل و w عرض هادی مرکزی موجبر هم صفحه می‌باشد، g_0 فاصله پل از روی الکترود در بایاس صفر، Δ میزان انحراف پل، k ثابت فنر باریکه و ϵ_r ثابت دیالکتریک لایه عایق است.



شکل (۳): شماتیک سوئیچ و مدل مکانیکی آن

از آنجا که ظرفیت معادل خازن‌ها برابر است با:

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_{air}} + \frac{1}{C_d}} = \frac{\epsilon_0 w W}{g_0 - \Delta + \frac{t_d}{\epsilon_r}} \quad (3)$$

پس نیروی الکتروستاتیکی بین صفحات طبق رابطه زیر می‌باشد:

$$F_{el} = \frac{\epsilon_0 w W V^2}{2(g_0 - \Delta + \frac{t_d}{\epsilon_r})} \quad (4)$$

همچنین نیروی فنری بازگرداننده پل نیز برابر است با:

$$F_m = k \Delta \quad (5)$$

وقتی دو نیرو در حال تعادل باشند، رابطه زیر برقرار است:

$$F_{el} = \frac{\epsilon_0 w W V^2}{2(g_0 - \Delta + \frac{t_d}{\epsilon_r})} = k \Delta \quad (6)$$

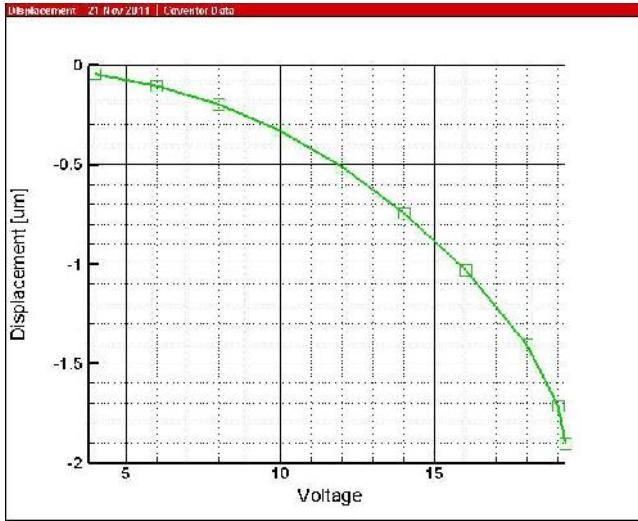
با توجه به رابطه (۶) ولتاژ تحریک بر حسب انحراف پل معلق Δ به صورت زیرخواهد بود:

نتیجه ثابت فنر باریکه معلق کمتر شده و ولتاژ تحریک، کاهش می‌یابد. ضخامت باریکه سوئیچ با توجه به عمق پوستی آلومینیوم که در جدول (۱) آورده شده است انتخاب می‌گردد.

جدول (۱): عمق پوستی آلومینیوم [۷]

فرکانس (GHz)	۱۰	۲۵	۴۰
عمق پوستی (μm)	۰.۸۲	۰.۵۲	۰.۴

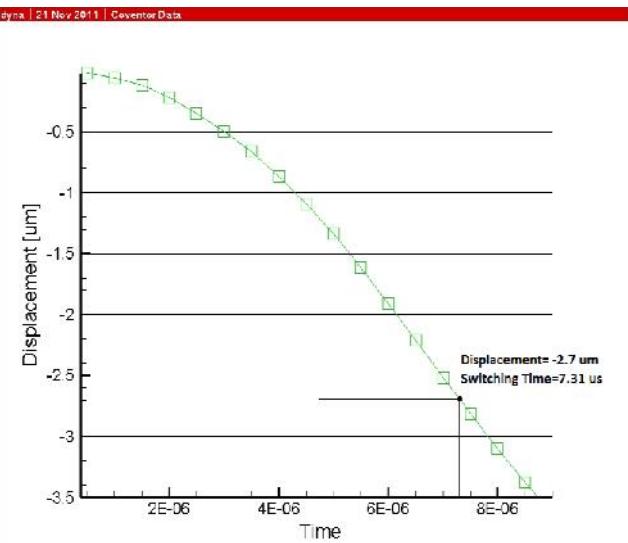
دیده می‌شود عمق پوستی آلومینیوم در فرکانس ۱۰ GHz $= 0.82 \mu\text{m}$ است، پس ضخامت باریکه برای عملکرد مناسب در فرکانس‌های کمتر از ۱۰ GHz، حداقل $t=1 \mu\text{m}$ باید باشد. فاصله هوایی بین دو الکترود (پل معلق و خط انتقال مرکزی)، g_0 ، هم در میزان تلفات و هم در مقدار ولتاژ تحریک مؤثر است. افزایش این پارامتر از طرفی باعث پایین آمدن تلفات شده و از طرفی دیگر ولتاژ تحریک را افزایش می‌دهد. با مصالحه بین این دو، مقدار فاصله هوایی $g_0=3 \mu\text{m}$ برگزیده می‌شود. برای انتخاب پهنهای پل نیز، افزایش آن موجب بزرگتر شدن ثابت فنر پل شده و از طرف دیگر مساحت مؤثر تحریک را هم افزایش می‌دهد، پس در مقدار ولتاژ تحریک اثری ندارد [۱۰]. ولی مقدار خازن‌های حالت روشن و خاموش را تغییر داده بطوریکه کاهش پهنهای باریکه موجب کاهش خازن پارازیتی ایجاد شده در حالت سوئیچ روشن شده و تلفات را کاهش می‌دهد، ولی مقدار ایزولاسیون در حالت سوئیچ خاموش نیز کاهش می‌یابد. بنابراین عرض باریکه $w=100 \mu\text{m}$ انتخاب می‌شود. لایه دیالکتریک روی هادی مرکزی، اکسید سیلیکون با ضربی دیالکتریک $= 3/9 \epsilon_r$ برگزیده شد تا بتوان از فرآیند سونش مرتبط (استفاده از هیدروفلوریک اسید (HF)) در ساخت سوئیچ استفاده کرد. در اینصورت نیازی به استفاده از تجهیزات گران قیمت سونش خشک نخواهد بود. هرچه ضخامت لایه دیالکتریک کمتر یا ثابت دیالکتریک بالاتر باشد، عملکرد سوئیچ بهتر است. ولی در کاهش مقدار ضخامت محدودیت وجود دارد. با توجه به محدودیت‌های موجود در پیاده‌سازی، میزان سختی و مشخصات لایه دیالکتریک، کمترین ضخامت لایه دیالکتریک حدود ۱۰۰ nm است [۸]. اکسید سیلیکون بهروش تبخیر توسط باریکه الکترونی لایه نشانی خواهد شد. بنابراین ضخامت لایه عایق $t_d=300 \text{ nm}$ انتخاب می‌شود، تا ظرفیت خازنی مناسبی در حالتی که باریکه سوئیچ پایین است، بدست آید. ابعاد طراحی شده در جدول (۲) آورده شده است.



شکل (۵): جابجایی باریکه بر حسب ولتاژ اعمالی

۳-۳- تحلیل گذرای سوئیچ

زمان سوئیچینگ از پارامترهای مهم یک سوئیچ RF MEMS است و به مدت زمانی که طول می‌کشد تا پس از اعمال ولتاژ تحریک سوئیچ تغییر وضعیت دهد، اتلاق می‌شود. این پارامتر بیانگر سرعت سوئیچ نیز می‌باشد. زمان سوئیچینگ باید تا حد امکان کوچک باشد تا سرعت سوئیچینگ افزایش یابد. برای سوئیچ‌های میکروالکترومکانیکی، بدلیل وجود اینرسی در سازه مکانیکی سوئیچ، این زمان از مرتبه میکرو ثانیه ($1\text{-}300\text{ }\mu\text{s}$) است. در حالیکه برای سوئیچ‌های نیمه‌هادی، این زمان از مرتبه نانو ثانیه ($1\text{-}100\text{ ns}$) می‌باشد. بهمین دلیل زمان سوئیچینگ بیشتر، یکی از معایب سوئیچ‌های میکروالکترومکانیکی محسوب می‌شود [۱۰]. سوئیچ مورد نظر در نرمافزار CoventorWare تحلیل گذرا شده و نتیجه در شکل (۶) آورده شده است.



شکل (۶): جابجایی باریکه سویچ بر حسب زمان در ولتاژ ۲۰ ولت

$$V = (g_0 - \Delta + \frac{t_d}{\varepsilon_r}) \sqrt{\frac{2k\Delta}{\varepsilon_0 w W}} \quad (7)$$

ولتاژ پایین کشنده، ولتاژی است که در آن باریکه به اندازه دو سوم فاصله هوایی پایین می‌آید. در این فاصله افزایش نیروی الکترواستاتیکی بیشتر از افزایش نیروی بازگرداننده است. در نتیجه در این فاصله وضعیت باریکه ناپایدار شده و باریکه به پایین سقوط می‌کند. بنابراین:

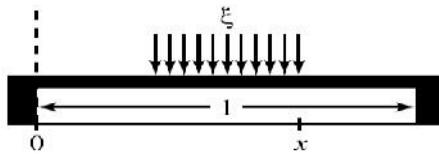
$$V_{PI} = \left(\frac{2}{3} g_0 + \frac{t_d}{\varepsilon_r} \right) \sqrt{\frac{2kg_0}{3\varepsilon_0 w W}} \cong \sqrt{\frac{8kg_0^3}{27\varepsilon_0 w W}} \quad (8)$$

ولتاژ پایین نگه‌دارنده نیز حداقل ولتاژی است که پل را در موقعیت پایین نگه می‌دارد:

$$V_h = V(\Delta = g_0) = \left(\frac{t_d}{\varepsilon_r} \right) \sqrt{\frac{2kg_0}{\varepsilon_0 w W}} \quad (9)$$

در باریکه سوئیچ که از دو طرف ثابت شده است، اگر نیرو به یک سوم میانی اعمال شود (شکل (۴)), ثابت فنر برابر است با [۱۰]:

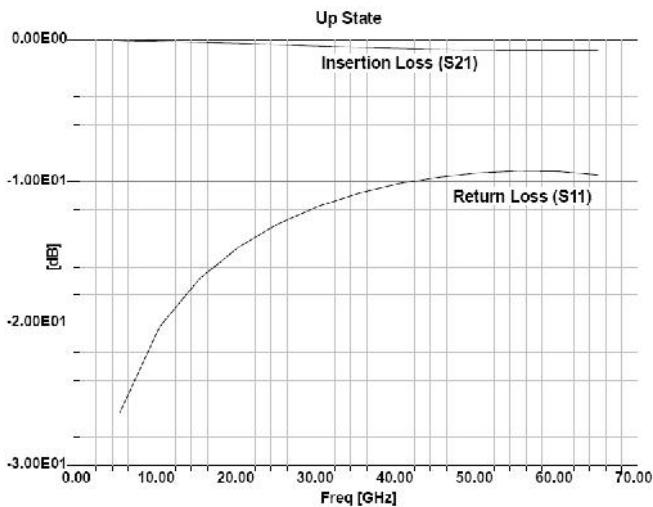
$$k = 32Ew \left(\frac{t}{l} \right)^3 \quad (10)$$



شکل (۴): اعمال نیرو به یک سوم میانی باریکه سوئیچ

بنابراین ثابت فنر سازه سوئیچ، با استفاده از رابطه (۱۰) برابر $k = 3/26 N/m$ می‌شود. از این‌رو، ولتاژ پایین کشنده طبق رابطه (۸) $V_{PI} = 19/19\text{ V}$ بددست می‌آید. سوئیچ در نرم افزار CoventorWare، با استفاده از روش المان محدود، تحلیل الکترومکانیکی گردید. نتیجه در شکل (۵) نشان داده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود در ولتاژ حدود $V_{PI} = 19/25\text{ V}$ جابجایی باریکه سوئیچ حدود $\Delta = 2\text{ }\mu\text{m}$ (دو سوم فاصله هوایی) است. بنابراین، ولتاژ پایین کشنده سوئیچ $V_{PI} = 19/25\text{ V}$ بددست می‌آید.

مشاهده می شود که زمان لازم برای جابجایی $\Delta = 2/7 \mu\text{m}$ در ولتاژ تحریک $V = 20 \text{ V}$, $t = 7/31 \mu\text{s}$ است. این زمان برای یک سوئیچ RF MEMS سرعت کمی است، در نتیجه سوئیچ گردنگ مناسب خواهد بود.



شکل (۷): پارامترهای سوئیچ در وضعیت روشن

با نگاهی به مقدار تلفات داخلی، دیده می شود که تلفات پایین است و بیشتر سیگنال از خط انتقال عبور می کند. تلفات بازگشتی نیز حاصل بوجود آمدن خازن پارازیتی، بدلیل نزدیکی مسیر سیگنال به باریکه زمین شده معلق روی آن است [۱۳]. مقدار این خازن (خازن حالت بالا) با استفاده از رابطه (۵) برابر $C_{\parallel} = 23/0.1 \text{ fF}$ بدست می آید. هرچه فرکانس افزایش یابد، مقدار تلفات بازگشتی کم می شود، بطوریکه در فرکانس 65 GHz به مقدار $9/8 \text{ dB}$ می رسد. این بدين معناست که در فرکانس ها بالاتر دامنه سیگنال بازگشتی بزرگتر می شود (بدلیل اینکه تلفات بازگشتی کمتر شده است). با توجه به مقدادر بدست آمده از تحلیل موجی سوئیچ در وضعیت روشن، می توان نتیجه گرفت که سوئیچ عملکرد خوبی در باند فرکانسی $40-60 \text{ GHz}$ از خود نشان می دهد، چراکه در این باند فرکانسی تلفات داخلی در حدود $8/0 \text{ dB}$ است.

۲-۴-۳- سوئیچ در وضعیت خاموش (باریکه در موقعیت پایین)

با اعمال ولتاژ به خط انتقال مرکزی، در اثر نیروی الکترواستاتیکی باریکه به پائین کشیده شده و به لایه دی- الکتریک می چسبد. در اینصورت سوئیچ در حالت خاموش قرار گرفته و ظرفیت خازنی خیلی زیادی (از مرتبه pF) ایجاد می شود. سوئیچ در وضعیت روشن بصورت پلکانی مدل شده و در رنج فرکانسی 65 GHz - 65 GHz شبیه سازی گردید و پارامترهای S آن

۴-۳- تحلیل موجی سوئیچ

پارامترهای مهم در تحلیل یک سوئیچ RF MEMS، تلفات داخلی، ایزولاسیون و ولتاژ تحریک هستند. در بخش قبل ولتاژ تحریک با استفاده از تحلیل همزمان الکترومکانیکی با نرم افزار CoventorWare و نیز از طریق محاسبه، بدست آمد. برای استفاده می شود. برای این منظور ساختار سوئیچ در دو حالت سوئیچ در وضعیت روشن (باریکه در موقعیت بالا) و سوئیچ در وضعیت خاموش (باریکه در موقعیت پایین) در نرم افزار HFSS شبیه سازی و نتایج بدست آمده تحلیل گردید.

نرم افزار HFSS، روش المان محدود را بکار گرفته و فضای مورد نظر را به چهار وجهی های متعددی تقسیم نموده و میدان ها را در هر سلول تقریب می زند. معادلات موج برای میدان های الکتریکی و مغناطیسی بطور مستقل حل گردیده و نتایج در معادلات ماکسول زیر آزمایش می شود:

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + j\omega \epsilon \vec{E} \quad (11)$$

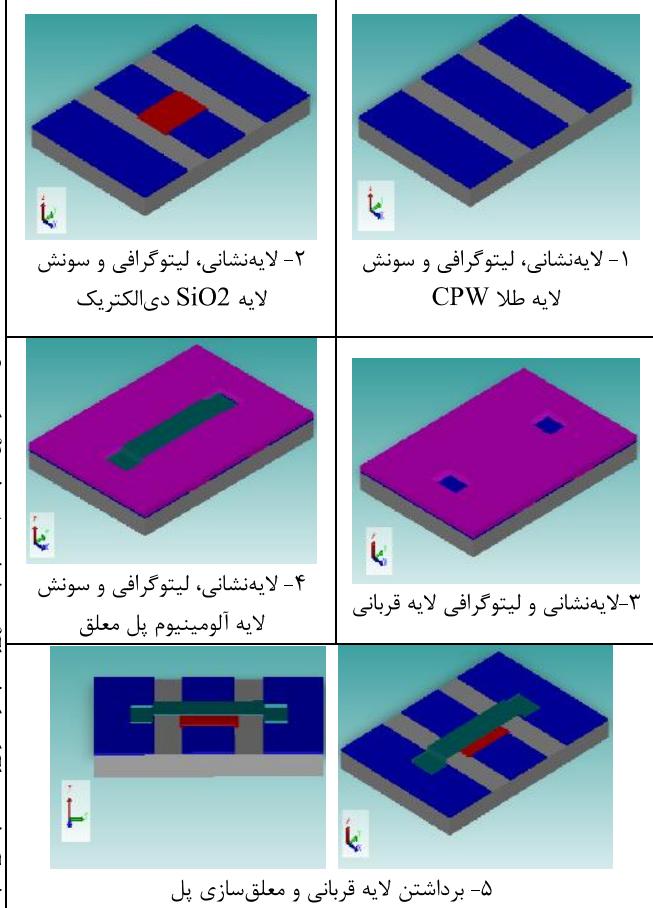
$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega \mu \vec{H} \quad (12)$$

در صورت قابل قبول بودن نتایج، میدان های الکتریکی و مغناطیسی موردنظر بدست می آید. روش کار در HFSS با شبکه بندی تمام فضای مورد نظر با چهار وجهی شروع می شود. شبکه بندی اولیه با توجه به دقت در گام های بعدی بصورت بهینه قابل تصحیح است. با استفاده از مقادیر میدان ها پارامترهای S بدست می آیند. روش های تحلیل موجبر هم صفحه عمدتاً در مد TEM و به کمک نگاشت هم دیس بوده و منجر به رابطه های تجربی می گردد که بستگی فرکانسی در آن ها منظور نشده و ضخامت هادی ها یکسان فرض می شود [۱۱ و ۱۲].

۴-۳- سوئیچ در وضعیت روشن (باریکه در موقعیت بالا)

همانطور که اشاره شد، در صورتیکه ولتاژ تحریکی اعمال نشود، پل به شکل یک خازن کوچک پارازیتی (از مرتبه fF) ظاهر می شود که در حالت ایده آل می توان از آن صرف نظر نمود. در اینصورت سوئیچ در حالت روشن قرار دارد. سوئیچ در رنج فرکانسی 65 GHz - 65 GHz شبیه سازی شده و پارامترهای S آن

فرآیند ساخت با لایه‌نشانی طلا بعنوان فلز لایه موجبرهم-صفحه آغاز می‌شود. برای این منظور لایه طلا به ضخامت $1\mu\text{m}$ به روش تبخیر حرارتی لایه‌نشانی می‌گردد. سپس با ماسک مربوط به موجبرهم‌صفحه لیتوگرافی نوری شده و در محلول $\text{KI:I}_2:\text{H}_2\text{O}$ سونش می‌شود (مرحله اول). بعد از آن یک لایه نازک اکسید سیلیکون (SiO_2) به ضخامت 300 nm بعنوان لایه دی‌الکتریک روی هادی مرکزی، با روش تبخیر حرارتی توسط پرتوی الکترون لایه نشانی، و سپس با ماسک مربوط به لایه دی‌الکتریک، لیتوگرافی نوری شده و در محلول بافر هیدروفلوریک اسید (BHF) سونش می‌گردد (مرحله دوم). گام بعدی، لایه‌نشانی لایه قربانی است. لایه قربانی برای معلق سازی سازه‌ها ضروری است. این لایه بعد از اینکه ساختار معلق شکل گرفت، برداشته می‌شود. مواد مختلفی بعنوان لایه قربانی استفاده می‌شوند، از جمله اکسید سیلیکون، پلی سیلیکون و بسیاری از فوتورزیست‌ها.



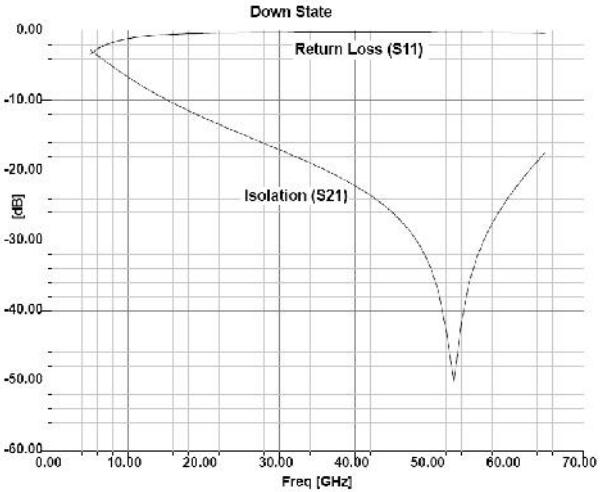
شکل (۹): شماتیک مراحل ساخت سوئیچ RF MEMS مورد نظر

در اینجا از فوتورزیست مثبت شیپلی ۱۸۱۳ بعنوان ماده قربانی استفاده شده است. دو مرحله فوتورزیست توسط لایه‌نشانی چرخشی لایه‌نشانی و پخت داده شد، تا ضخامت لایه

بدست آمد. نتیجه شبیه‌سازی در شکل (۸) آورده شده است. دیده می‌شود ایزولاسیون ("S₂₁") در حالت سوئیچ خاموش در فرکانس‌های ۴۰–۶۰ GHz مقدار مناسبی دارد (بیشتر از ۲۴dB)، و در محدوده فرکانس‌های ۵۳GHz بهترین ایزولاسیون (حدود ۵۰ dB) بدست می‌آید. در فرکانس‌های پایین‌تر، ایزولاسیون توسط ظرفیت خازنی بزرگ ایجاد شده (خازن حالت پایین) تعیین می‌شود. مقدار خازن برابر

$$C_d = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r w W}{t_d} = 0.92 \text{ pF}$$

خازن از نظر مداری اتصال کوتاه شده و مقاومت سری مؤثر سوئیچ، تعیین کننده مقدار ایزولاسیون است [۱۳]. تلفات بازگشتی ("S₁₁") هم در اینحالت با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد، که در فرکانس‌های بالاتر از ۲۰ GHz تقریباً صفر است.

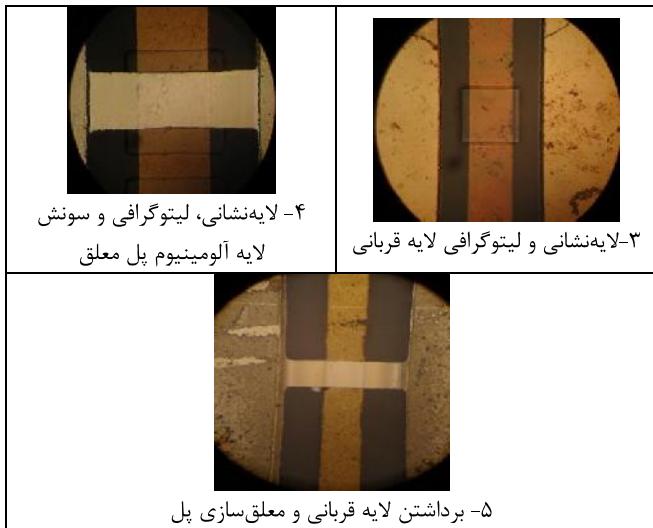


شکل (۸): پارامترهای سوئیچ در وضعیت خاموش

بنابراین سوئیچ در وضعیت خاموش نیز عملکرد بسیار خوبی در باند فرکانسی ۴۰–۶۰ GHz دارد، چراکه در این باند ایزولاسیون بیشتر از ۲۴dB و تلفات بازگشتی بسیار ناچیز است.

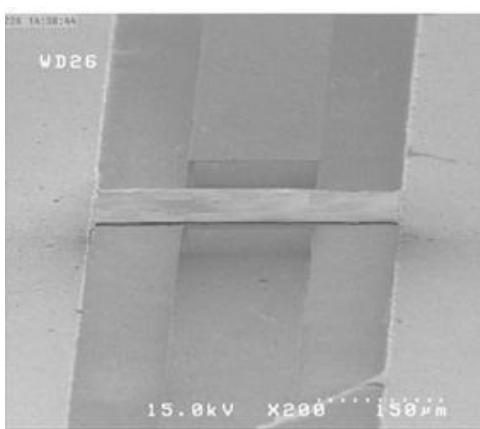
۴- ساخت سوئیچ و اندازه‌گیری پارامترهای آن

پس از طراحی و شبیه‌سازی، سوئیچ RF MEMS مورد نظر با استفاده از روش میکروماشین کاری سطحی ساخته شد. برای این منظور پروسه‌ای با ۴ ماسک (حداقل تعداد ممکن برای ساخت سوئیچ) طراحی گردید. سوئیچ مورد نظر بروی بستر عایق آلومینا ساخته شد تا تلفات زیرلایه در فرکانس‌های رادیویی از بین رفته و ساختار از طریق بستر، اتصال اهمی نداشته باشد. شماتیک پروسه ساخت در ۵ مرحله اصلی در جدول (۳) آورده شده است.



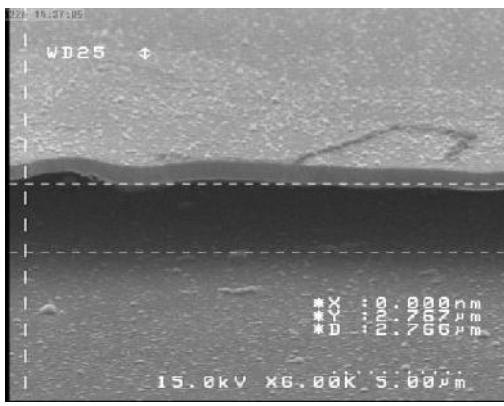
شکل (۱۰): تصاویر مراحل ساخت سوئیچ RF MEMS مورد نظر

در شکل (۱۱) نیز تصویر میکروسکوپ پویش الکترونی نمونه آزمایشگاهی ساخته شده آورده شده است.



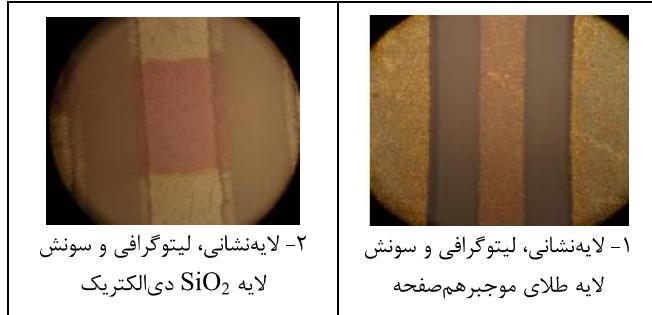
شکل (۱۱): تصویر میکروسکوپ پویش الکترونی سوئیچ RF MEMS

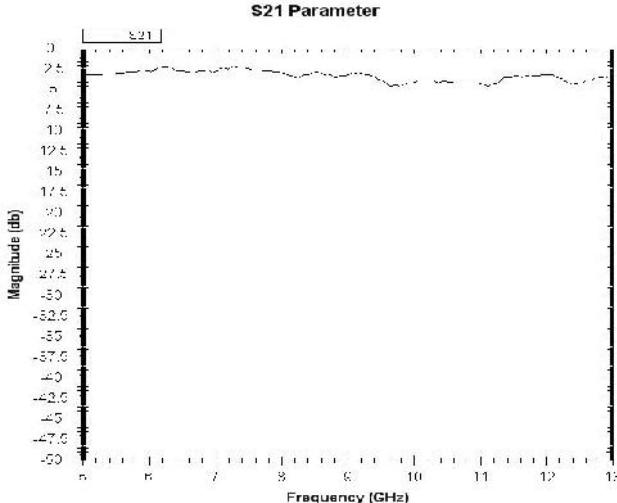
مطابق شکل (۱۲) دیده می شود که فاصله هوایی بوجود آمده حدود ۲/۷۶۷ nm بوده، که نزدیک مقدار طراحی شده است.



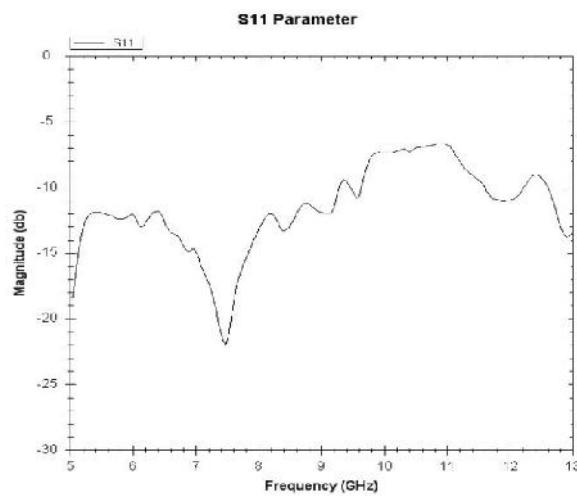
شکل (۱۲): فاصله هوایی ایجاد شده زیر پل معلق

قربانی به مقدار مورد نظر ($3\mu\text{m}$) نزدیکتر شود. پس از لایه نشانی لایه قربانی، این لایه توسط ماسک پایه ها لیتوگرافی نوری می شود (مرحله سوم)، بعد از آن یک لایه آلومینیوم به ضخامت $1\mu\text{m}$ ، بعنوان لایه پل معلق، با روش تبخیر حرارتی توسط پرتوی الکترونی، لایه نشانی می گردد. در این مرحله باید دقت شود که دمای نمونه ها در حین لایه نشانی از حدود 100°C بالاتر نرسد، چرا که به دلیل وجود فوتورزسیت (بعنوان لایه قربانی) دمای بالاتر از این مقدار می تواند موجب آسیب دیدن فوتورزسیت شود که مطلوب نیست. سپس با استفاده از ماسک مربوط به پل معلق، این لایه لیتوگرافی نوری شده و در محلول سونش گر اسید فسفریک (۱:۱)، سونش می شود (مرحله چهارم). آخرین و مهمترین مرحله در ساخت سوئیچ، معلق سازی است. در این مرحله فوتورزسیت لایه قربانی برداشته شده و پل بصورت معلق روی خط مرکزی موجبره مصفحه قرار می گیرد. برای این منظور ابتدا نمونه ها در محلول استون قرار داده شده تا فوتورزسیت لایه قربانی برداشته شود. سپس نمونه ها در ظرفی حاوی ایزوپروپانول (IPA) به مدت ۵ دقیقه قرار گرفته تا ایزوپروپانول جایگزین استون در زیر لایه پل معلق گردد. سپس، نمونه ها در ظرف ترت بوتانول مایع ($\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$) گذاشته می شوند. ترت بوتانول ماده ای است که در دمای زیر 20°C جامد بوده و در دمای $23-25^\circ\text{C}$ ذوب می شود. نمونه ها از داخل محلول بیرون آورده شده، بطوری که روی آن ها هنوز بوتانول مایع وجود دارد. با پایین آوردن دمای نمونه ها، بوتانول جامد شده و نمونه ها بسرعت در اتاق خلاء قرار داده می شوند؛ در اینصورت بوتانول بخ زده در زیر لایه پل معلق، تتعیید شده و پل معلق آزاد می گردد (مرحله پنجم). تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ از مراحل فوق، در جدول (۴) آورده شده است.





شکل (۱۴): تلفات داخلی سوئیچ مورد نظر



شکل (۱۵): تلفات بازگشتی سوئیچ مورد نظر

RF MEMS موازی بر روی موجبر هم صفحه طراحی و ابعاد هندسی آن بدست آمده است. تحلیل و شبیه‌سازی الکترواستاتیکی و گذراي سوئیچ با استفاده از نرم افزار CoventorWare و بکارگیری روش المان محدود انجام شد، که ولتاژ پایین کشنه حدود ۱۹/۲۵ ولت حاصل شده است. در ادامه، تحلیل موجی سوئیچ در دو وضعیت روشن و خاموش با استفاده از نرم افزار HFSS و بکارگیری روش المان محدود انجام شده که نتیجه شبیه‌سازی در حالت روشن، نشان می‌دهد که سوئیچ عملکرد خوبی در باند فرکانسی ۴۰-۶۰ GHz دارد و تلفات داخلی در این باند حدود ۸/۰ dB و تلفات بازگشتی نیز کمتر از ۹/۸ dB است. سوئیچ در حالت خاموش نیز شبیه‌سازی شده، که نتیجه آن بیانگر عملکرد بسیار مناسب سوئیچ در حالت خاموش در این باند است، بطوريکه در این باند مقدار ايزولاسيون مناسب ۵۰ dB و تلفات بازگشتی بسیار ناجیز حاصل شده است. با توجه به طراحی انجام گرفته، نمونه آزمایشگاهی سوئیچ RF

پس از پایان مراحل ساخت، بمنظور بدست آوردن مشخصات عملکردی سوئیچ، در حد امکانات موجود اندازه‌گیری‌های توسعه تحلیلگر شبکه hp در رنج فرکانسی ۵-۱۳ GHz صورت گرفت. به دلیل در دسترس نبودن پروب‌های مخصوص اندازه‌گیری‌های موجبر هم صفحه (پروب‌های G/S/G)، و بمنظور اندازه‌گیری مشخصات RF سوئیچ، از روش پیشنهادی نشان داده شده در شکل (۱۱) همراه با کانکتورهای SMA با امپدانس مشخصه ۵۰ Ω استفاده شد.



شکل (۱۳): روش پیشنهادی برای اندازه‌گیری پارامترهای سوئیچ

در این روش خطوط موجبر هم صفحه توسط نرم افزار HFSS بگونه‌ای طراحی شدند که در دو طرف نمونه دارای تطبیق امپدانس ۵۰ Ω باشند. سپس کانکتورها توسط چسب نقره و فیکسچر طراحی شده به موجبر هم صفحه متصل شدند. این روش ایده‌آل نیست، چراکه مقاومت خط زمین اتصالات، حدود ۱/۵ Ω بوده که مقدار قابل ملاحظه‌ای است.

نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط این روش در شکل - های (۱۲) و (۱۳) آورده شده است. دیده می‌شود تلفات داخلی (S₂₁) حدود ۲/۵ dB و مقدار تلفات بازگشتی (S₁₁) نیز بیشتر از ۱۰ dB در رنج فرکانسی ۵-۱۳ GHz است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک موجبر هم صفحه با امپدانس مشخصه ۵۰ Ω با استفاده از نرم افزار HFSS طراحی گردیده است. سپس یک سوئیچ

MEMS ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته است، که مقدار تلفات داخلی $2/5\text{dB}$ و تلفات بازگشتی بیشتر از 10dB حاصل شده است.

مراجع

- [1] Rebeiz G.M., Muldavin J.B., RF MEMS switches and switch circuits, IEEE Microwave Magazine, pp.5–71, 2001.
- [2] Katehi, L. P. B., Harvey, J. F. and Brown, E., "MEMS and micromachined circuits for High-Frequency application," IEEE MTT, Vol. 50, No. 3, PP. 858-866, 2002.
- [3] Qian, J. Y., Li, G. P. and De Flaviis, F., "A parametric model of MEMS capacitive switch operating at microwave frequencies." IEEE Int. Microwave Symp. Digest, Vol.2, PP. 1229-1232, 2000
- [4] Muldavin, J. B. and Rebeiz, G. M., "High-Isolation CPW MEMS Shunt Switches Part 1:Modeling." IEEE MTT, Vol. 48, No. 6, PP. 1045-1052, 2000.
- [5] Vijay K. Varadan, K.J. Vinoy, K.A. Jose, RF MEMS and their applications, John Wiley & Sons, INC, 2003.
- [6] Guo F.M., Zhu Z.Q., Long Y.F., Wang W.M., Zhu S.Z., Lai Z.S., Li N., Yang G.Q., Lu W., "Study on low voltage actuated MEMS rf capacitive switches", Sensors and Actuators, Vol. 108,PP. 128–133, 2003.
- [7] Ai-Qun Liu, RF MEMS Switches and Integrated Switching circuits Design, Fabrication, and Test, Springer, 2010.
- [8] Mafinejad Y., Kouzani A.Z., Mafinezhad K., "Design and Simulation of a RF MEMS Shunt Switch for Ka and V Bands and the Impact of Varying Its Geometrical Parameters.", IEEE Int. Midwest Symp. On circuits and systems, Vol.12, PP. 823-826, 2009.
- [9] Yunhong Wu, Harold S. Gamble, B. Mervyn Armstrong, "SiO Interface Layer Effects on Microwave Loss of High-Resistivity CPW Line", IEEE Microwave and Guided Wave Letters, Vol. 9, No. 1, PP. 10-12, 1999.
- [10] Gabriel M. Rebeiz, RF MEMS: Theory, Design, and Technology, John Wiley & Sons, INC, 2003.
- [11] Simons, R. N., Coplanar waveguide circuits, component and systems., John Wiley & Sons, INC, 2001.
- [12] Nguyen, C., Analysis methods for RF, microwave, and millimeter-wave planar transmission line Structures. John Wiley & Sons, INC. , 2002.
- [13] Goldsmith C. L., Yao Z., Eshelman S., Denniston D., "Performance of Low-Loss RF MEMS Capacitive Switches.", IEEE Microwave and GuidedWave Letters Vol.8, NO.8, PP. 269-271, 1998.

¹ Coplanar Waveguide

² Skin depth

³ Pull-in voltage

⁴ Pull-in voltage

