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

سعید دل‌آرام فریمانی[۱] حسن حاج‌قاسم[۲] علیرضا عرفانیان[۳] مجیدرضا علی احمدی[۴]

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- مربی- 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 GHz ۶۰-۴۰ ارائه شده است. مکانیزم تحریک این سوئیچ بصورت الکترواستاتیکی است. ابتدا موجبر هم‌صفحه برای داشتن امپدانس مشخصه ۵۰Ω 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 کشنده ۱۹/۲۵v، تلفات داخلی ۰/۸dB، تلفات بازگشتی بیشتر از ۹/۸dB و مقدار ایزولاسیون نیز ۵۰dB 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 ۲/۵dB و تلفات بازگشتی بیشتر از ۱۰dB حاصل شده است.

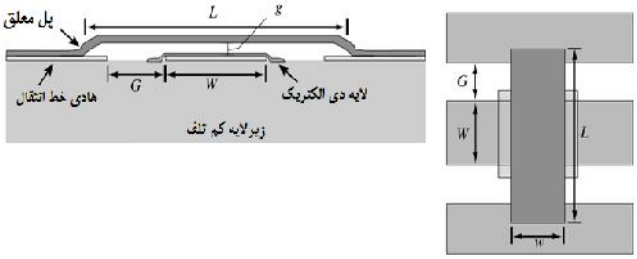
کلمات کلیدی: سوئیچ RF MEMS، موجبر هم‌صفحه، تحریک الکترواستاتیکی، تلفات داخلی، ایزولاسیون

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، لویزان، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، دانشکده برق و الکترونیک، صندوق پستی: ۱۷۷۴-۱۵۸۷۵

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-02]

۱- مقدمه

سوئیچ قطعه‌ای ساده اما ضروری درسیستم‌های مخابراتی، رادار، اندازه گیری وکنترل می‌باشد و بعنوان وسیله‌ای برای برقراری اتصال یا قطع یک مدارالکتریکی تعریف می‌شود. درحالت 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 آنتن‌های میکرواستریپ و بطور عام در مهندسی آنتن و مایکروویو افزایش چشمگیری داشته و در سال‌های اخیر توجه محققان و مهندسان را به خود معطوف کرده است. در این میان سوئیچ بعنوان بلوک 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 عمده این سوئیچ‌ها نسبت به سوئیچ‌های نیمه هادی FET و دیودهای P-I-N می‌باشند. البته سرعت سوئیچینگ پائین و ولتاژ بایاس بالا از جمله معایب این سوئیچ هاست[۱]. سوئیچ موازی بر روی موجبر هم‌صفحه[1] (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 هم‌صفحه 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.



شکل (۱): شماتیک یک سوئیچ RF MEMS

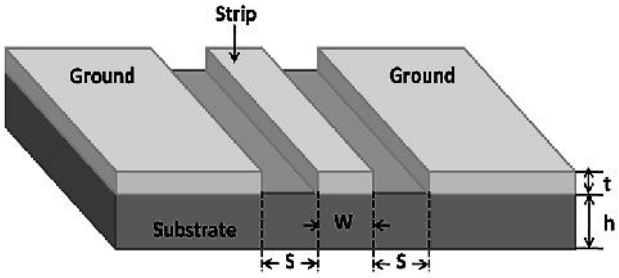
روش‌های مختلفی برای بررسی این ساختار وجود دارد. در مرجع [۳] مدل پارامتری عناصر فشرده برای یک سوئیچ خازنی، بر پایه تحلیل موجی کامل با شبیه ساز HFSS و با شرایط مرزی تشعشعی و هادی کامل ارائه شده است. بدست آوردن مقدار عناصر فشرده تشکیل دهنده سوئیچ و استخراج پارامترهای S با روش‌های عددی نیز در منبع [۴] بیان شده است. اما در اینجا پارامترهای RF مورد نظر با استفاده از شبیه‌سازی موجی کامل توسط نرم‌افزار HFSS ارائه گردیده است. از شبیه‌سازی المان محدود توسط نرم‌افزار 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 آلومینا استفاده شده است. در این مقاله ابتدا یک موجبر هم‌صفحه با امپدانس مشخصه ۵۰ اهم طراحی شده، سپس یک سوئیچ MEMS بر روی موجبر هم‌صفحه طراحی گردیده و تحلیل‌های الکترومکانیکی، گذرا و موجی آن توسط نرم افزارهای CoventorWare و HFSS انجام شده است.

۲- موجبر هم‌صفحه

موجبر هم‌صفحه یک خط انتقال یک طرفه با سه هادی رسانا بروی یک بستر عایق است. موجبرهم‌صفحه 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 اجازه اتصال المان‌ها را می‌دهند. موجبرهای هم‌صفحه بطور عمده برای عناصر مداری و خطوط متصل بهم استفاده می‌شوند.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-02]



شکل (۲): شماتیک موجبر هم صفحه

ساختار موجبر هم‌صفحه از مد انتشار شبه 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].

۲-۱- 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]:

$$Z0 = \frac{30\pi^2}{\sqrt{(\varepsilon_r+1)/2}}\left[Ln\left(2\frac{1+\sqrt{K}}{1-\sqrt{K}}\right)\right] \quad (۱)$$

$$K = \frac{W}{W+2S} \quad (۲)$$

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 $\varepsilon_r = ۹/۸$ و Loss Tangent=۰/۰۰۰۵ و ضخامت h=۵۰۰μm و هادی‌ها از جنس طلا با رسانندگی s/m ۴/۱e۷ و ضخامت t=۱μm است. در اینصورت می‌توان از سونش مرطوب برای سونش لایه دی‌الکتریک روی هادی مرکزی (اکسید سیلیکون) استفاده کرد، چراکه سونش‌گر اکسید سیلیکون (بافر هیدروفلوریک اسید) آسیبی به لایه طلا نمی‌رساند. ابعاد موجبر هم‌صفحه برای داشتن بهترین تطبیق امپدانس (۵۰Ω) توسط نرم‌افزار HFSS بصورت W=۱۵۰μm و S=۱۱۵μm 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 ۵-۱۰KΩ.cm استفاده می‌شود. ولی بدلیل اینکه سیلیکون بستر عایق کامل نیست، در هنگام بایاس dc، جریان‌های نشتی بین خط سیگنال و خط زمین جاری می‌شوند و باعث ایجاد تلفات می‌گردند. به همین دلیل، زیر هادی‌های 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 پایین پوشانده می‌شود. در اینصورت هم از چسبیدن ناخواسته الکترودها جلوگیری کرده و هم خازنی تشکیل می‌دهد که موجب عملکرد مناسب سوئیچ در فرکانس‌های بالاتر از ۱۰GHz 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.

۳-۱- طراحی ابعاد سوئیچ

با درنظر گرفتن ابعاد طراحی شده برای موجبر هم صفحه W+۲S=۳۸۰μm می‌باشد. پس طول باریکه سوئیچ، l=۳۸۰μm، انتخاب می‌شود. جنس باریکه از آلومینیوم انتخاب شده، چراکه علاوه‌بر داشتن رسانندگی الکتریکی مناسب (s/m ۳/۵۳e۷)، ماژول یانگ نسبتاً پایینی دارد (E=۷۰GPa). در

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-02]

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[۲] آلومینیوم [۷]

فرکانس (GHz)	۱۰	۲۵	۴۰
عمق پوستی (μm)	۰/۸۲	۰/۵۲	۰/۴

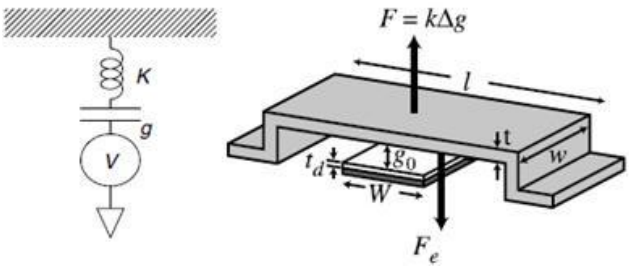
دیده می‌شود عمق پوستی آلومینیوم در فرکانس ۱۰GHz، $\delta = ۰/۸۲\mu m$ است، پس ضخامت باریکه برای عملکرد مناسب در فرکانس‌های کمتر از ۱۰GHz، حداقل $t=۱\mu m$ باید باشد. فاصله هوایی بین دو الکترود (پل معلق و خط انتقال مرکزی)، g_0، هم در میزان تلفات و هم در مقدار ولتاژ تحریک مؤثر است. افزایش این پارامتر از طرفی باعث پایین آمدن تلفات شده و از طرفی دیگر ولتاژ تحریک را افزایش می‌دهد. با مصالحه بین این دو، مقدار فاصله هوایی $g_0=۳\mu m$ برگزیده می‌شود. برای انتخاب پهنای 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 پهنای 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 $w=۱۰۰\mu m$ انتخاب می‌شود. لایه دی‌الکتریک روی هادی مرکزی، اکسید سیلیکون با ضریب دی‌الکتریک $\varepsilon_r = ۳/۹$ برگزیده شد تا بتوان از فرآیند سونش مرطوب (استفاده از هیدروفلوئوریک 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 ۱۰۰nm است [۸]. اکسید سیلیکون به‌روش تبخیر توسط باریکه الکترونی لایه نشانی خواهد شد. بنابراین ضخامت لایه عایق $t_d=۳۰۰nm$ انتخاب می‌شود، تا ظرفیت خازنی مناسبی در حالتی‌که باریکه سوئیچ پایین است، بدست آید. ابعاد طراحی شده در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲): ابعاد سوئیچ طراحی شده

پارامتر	اندازه (μm)	پارامتر	اندازه (μm)
h	۵۰۰	W	۱۰۰
W	۱۵۰	g_0	۳
S	۱۱۵	T	۱
L	۳۸۰	t_d	۰/۳

۳-۲- 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 A=w.W، مساحت الکترود است که W عرض پل و w عرض هادی مرکزی موجبر هم‌صفحه 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:

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_{air}} + \frac{1}{C_d}} = \frac{\varepsilon_0 wW}{g_0 - \Delta + \frac{t_d}{\varepsilon_r}} \quad (۳)$$

پس نیروی الکتروستاتیکی بین صفحات طبق رابطه زیر می‌باشد:

$$F_{el} = \frac{\varepsilon_0 wWV^2}{2(g_0 - \Delta + {t_d}/{\varepsilon_r})} \quad (۴)$$

همچنین نیروی فنری بازگرداننده پل نیز برابر است با:

$$F_m = k\Delta \quad (۵)$$

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

$$F_{el} = \frac{\varepsilon_0 wWV^2}{2(g_0 - \Delta + {t_d}/{\varepsilon_r})} = k\Delta \quad (۶)$$

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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-02]

$$V = (g_0 - \Delta + {t_d}/{\varepsilon_r})\sqrt{\frac{2k\Delta}{\varepsilon_0 wW}} \qquad (۷)$$

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:

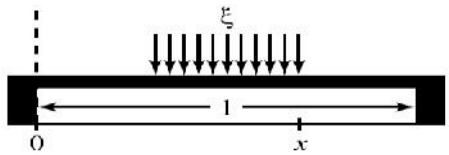
$$V_{PI} = (\frac{2}{3}g_0 + \frac{t_d}{\varepsilon_r})\sqrt{\frac{2kg_0}{3\varepsilon_0 wW}} \cong \sqrt{\frac{8kg_0^{\,3}}{27\varepsilon_0 wW}} \qquad (۸)$$

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

$$V_h = V(\Delta = g_0) = (\frac{t_d}{\varepsilon_r})\sqrt{\frac{2kg_0}{\varepsilon_0 wW}} \qquad (۹)$$

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]:

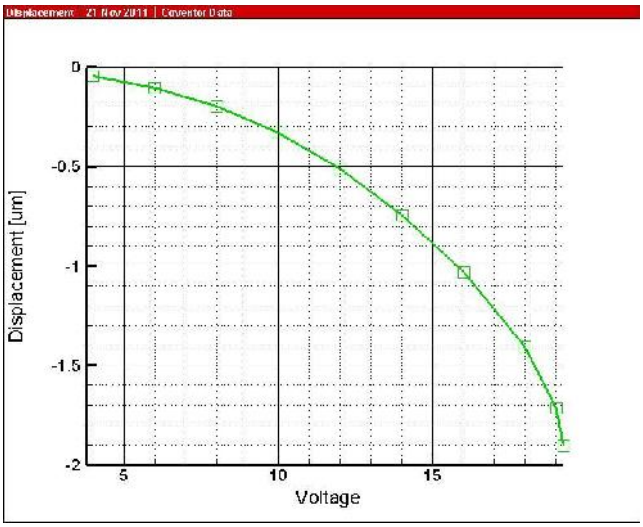
$$k = 32Ew\left(\frac{t}{l}\right)^3 \qquad (۱۰)$$



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

بنابراین ثابت فنر سازه سوئیچ، با استفاده از رابطه (۱۰) برابر $k = ۳/۲۶\ N/m$ می‌شود. ازاینرو، ولتاژ پایین کشنده طبق رابطه (۸) $V_{PI} = ۱۹/۱۹\text{V}$ بدست می‌آید. سوئیچ در نرم افزار CoventorWare، با استفاده از روش المان محدود، تحلیل الکترومکانیکی گردید. نتیجه در شکل (۵) نشان داده است.

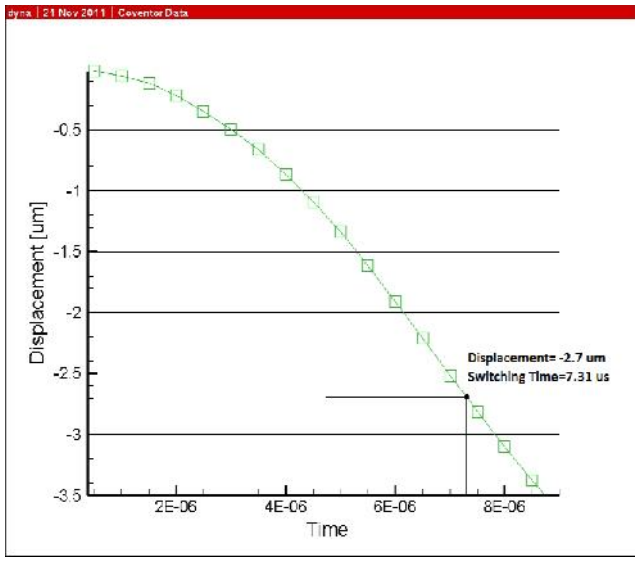
همانطورکه در این شکل دیده می‌شود در ولتاژ حدود $V_{PI} = ۱۹/۲۵\text{V}$ جابجایی باریکه سوئیچ حدود $\Delta = ۲\mu\text{m}$ (دو سوم فاصله هوایی) است. بنابراین، ولتاژ پایین کشنده سوئیچ $V_{PI} = ۱۹/۲۵\text{V}$ بدست می‌آید.



شکل (۵): جابجایی باریکه برحسب 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 (۱-۳۰۰μs) است. درحالیکه برای سوئیچ‌های نیمه‌هادی، این زمان از مرتبه نانو ثانیه (۱-۱۰۰ns) می‌باشد. به‌همین 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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-02]

مشاهده می‌شود که زمان لازم برای جابجایی $\Delta = ۲/۷\mu m$ در ولتاژ تحریک V=۲۰ V، t=۷/۳۱μs است. این زمان برای یک سوئیچ RF MEMS، زمان کمی است، در نتیجه سرعت سوئچینگ مناسب خواهد بود.

۳-۴- 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 نرم‌افزار CoventorWare و نیز از طریق محاسبه، بدست آمد. برای بدست آوردن پارامترها باقی مانده، از تحلیل موجی سوئیچ استفاده می‌شود. 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.

نرم‌افزار HFSS، روش المان محدود را بکار گرفته و فضای مورد نظر را به چهار وجهی‌های متعددی تقسیم نموده و میدان‌ها را در هر سلول تقریب می‌زند. معادلات موج برای میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بطور مستقل حل گردیده و نتایج در معادلات ماکسول زیر آزمایش می‌شود:

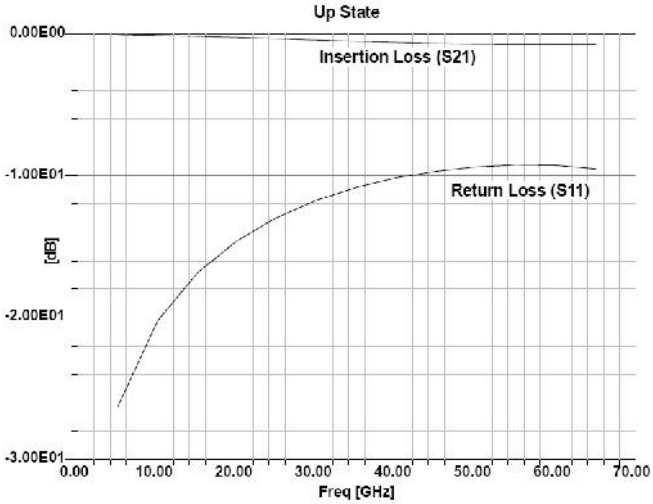
$$\nabla \times \vec{H} = \sigma\vec{E} + j\omega\varepsilon\vec{E} \qquad (۱۱)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \qquad (۱۲)$$

در صورت قابل قبول بودن نتایج، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی موردنظر بدست می‌آید. روش کار در HFSS با شبکه‌بندی تمام فضای مورد نظر با چهار وجهی شروع می‌شود. شبکه بندی اولیه با توجه به دقت در گام‌های بعدی بصورت بهینه قابل تصحیح است. با استفاده از مقادیر میدان‌ها پارامترهای S بدست می‌آیند. روش‌های تحلیل موجبر هم‌صفحه عمدتاً در مد TEM و به کمک نگاشت همدیس بوده و منجر به رابطه‌های تجربی می‌گردد که بستگی فرکانسی در آن‌ها منظور نشده و ضخامت هادی‌ها یکسان فرض می‌شود [۱۱ و ۱۲].

۳-۴-۱- 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 می‌شود که در حالت ایده‌آل می‌توان از آن صرفنظر نمود. در اینصورت سوئیچ در حالت روشن قرار دارد. سوئیچ در رنج فرکانسی ۰-۶۵ GHz شبیه‌سازی شده و پارامترهای S آن استخراج گردید. همانطور که در شکل (۷) دیده می‌شود، تلفات داخلی ("$S_{۲۱}$–") در حالت سوئیچ روشن) بین ۰dB و ۰/۸dB و تلفات بازگشتی ("$S_{۱۱}$-") نیز بین ۲۶dB و ۹/۵dB تغییر می‌کند.



شکل (۷): پارامترهای سوئیچ در وضعیت روشن

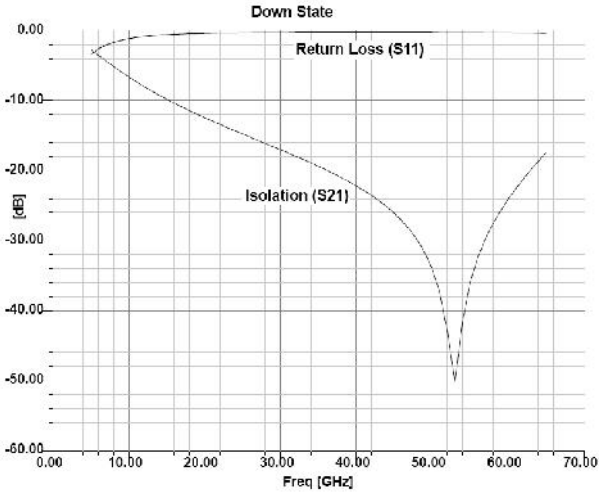
با نگاهی به مقدار تلفات داخلی، دیده می‌شود که تلفات پایین است و بیشتر سیگنال از خط انتقال عبور می‌کند. تلفات بازگشتی نیز حاصل بوجود آمدن خازن پارازیتی، بدلیل نزدیکی مسیر سیگنال به باریکه زمین شده معلق روی آن است [۱۳]. مقدار این خازن (خازن حالت بالا) با استفاده از رابطه (۵) برابر $C_u = ۲۳/۰۱\text{fF}$ بدست می‌آید. هرچه فرکانس افزایش یابد، مقدار تلفات بازگشتی کم می‌شود، بطوریکه در فرکانس ۶۵GHz به مقدار ۹/۸dB می‌رسد. این بدین معناست که در فرکانس‌ها بالاتر دامنه سیگنال بازگشتی بزرگتر می‌شود (بدلیل اینکه تلفات بازگشتی کمتر شده است). با توجه به مقادیر بدست آمده از تحلیل موجی سوئیچ در وضعیت روشن، می‌توان نتیجه گرفت که سوئیچ عملکرد خوبی در باند فرکانسی ۶۰-۴۰ GHz از خود نشان می‌دهد، چراکه در این باند فرکانسی تلفات داخلی در حدود ۰/۸dB است.

۳-۴-۲- 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 دی‌الکتریک می‌چسبد. در اینصورت سوئیچ در حالت خاموش قرار گرفته و ظرفیت خازنی خیلی زیادی (از مرتبه pF) ایجاد می‌شود. سوئیچ در وضعیت روشن بصورت پلکانی مدل شده و در رنج فرکانسی ۰-۶۵ GHz شبیه‌سازی گردید و پارامترهای S آن

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-02]

بدست آمد. نتیجه شبیه‌سازی در شکل (۸) آورده شده است. دیده می‌شود ایزولاسیون ("S_{21}– " در حالت سوئیچ خاموش) در فرکانس‌های GHz ۶۰-۴۰ مقدار مناسبی دارد (بیشتر از ۲۴dB)، و در محدوده فرکانس ۵۳GHz بهترین ایزولاسیون (حدود ۵۰dB) بدست می‌آید. در فرکانس‌های پایین‌تر، ایزولاسیون توسط ظرفیت خازنی بزرگ ایجاد شده (خازن حالت پایین) تعیین می‌شود. مقدار خازن برابر $C_d = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r wW}{t_d} = ۰/۹۲\text{pF}$ است. در فرکانس‌های بالاتر این خازن از نظر مداری اتصال کوتاه شده و مقاومت سری مؤثر سوئیچ، تعیین کننده مقدار ایزولاسیون است [۱۳]. تلفات بازگشتی ("S_{11}-") هم در اینحالت با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد، که در فرکانس‌های بالاتر از ۲۰GHz تقریباً صفر است.



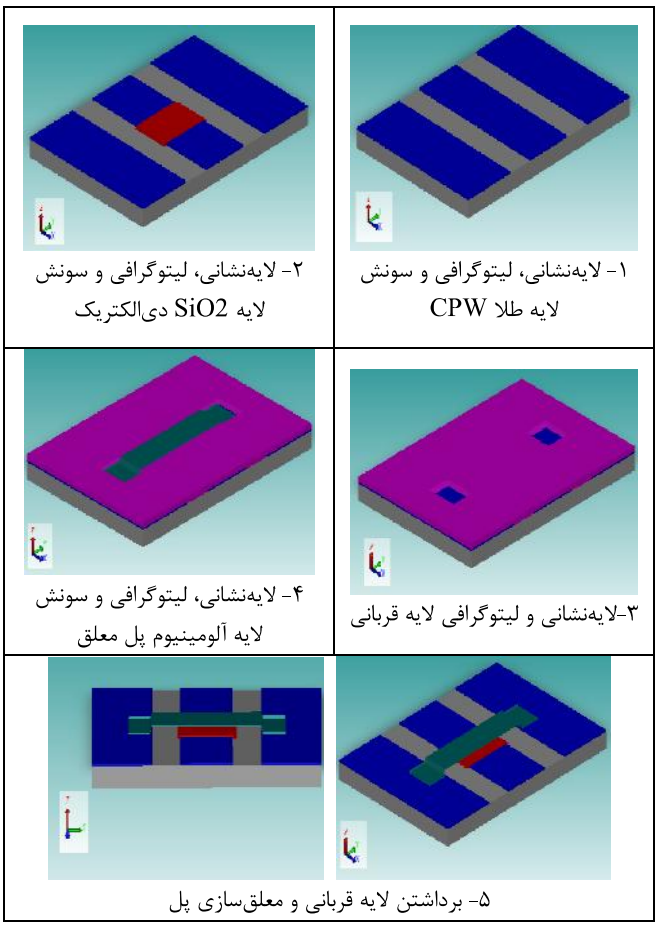
شکل (۸): پارامترهای سوئیچ در وضعیت خاموش

بنابراین سوئیچ در وضعیت خاموش نیز عملکرد بسیار خوبی در باند فرکانسی GHz ۶۰-۴۰ 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 میکروماشین‌کاری 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.

فرآیند ساخت با لایه‌نشانی طلا بعنوان فلز لایه موجبرهم-صفحه آغاز می‌شود. برای این منظور لایه طلا به ضخامت ۱μm به روش تبخیر حرارتی لایه‌نشانی می‌گردد. سپس با ماسک مربوط به موجبرهم‌صفحه لیتوگرافی نوری شده و در محلول $KI:I_2:H_2O$ سونش می‌شود (مرحله اول). بعد از آن یک لایه نازک اکسید سیلیکون (SiO_2) به ضخامت ۳۰۰nm بعنوان لایه دی‌الکتریک روی هادی مرکزی، با روش تبخیر حرارتی توسط پرتوی الکترون لایه نشانی، و سپس با ماسک مربوط به لایه دی-الکتریک، لیتوگرافی نوری شده و در محلول بافر هیدروفلوریک اسید (BHF) سونش می‌گردد (مرحله دوم). گام بعدی، لایه-نشانی 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 می-شوند، از جمله اکسید سیلیکون، پلی سیلیکون و بسیاری از فوتورزیست‌ها.

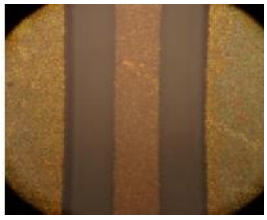


شکل(۹): شماتیک مراحل ساخت سوئیچ RF MEMS مورد نظر

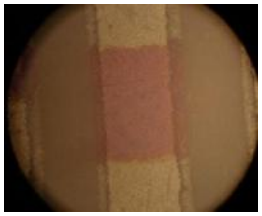
در اینجا از فوتورزیست مثبت شیپلی ۱۸۱۳ بعنوان ماده قربانی استفاده شده است. دو مرحله فوتورزیست توسط لایه-نشانی چرخشی لایه‌نشانی و پخت داده شد، تا ضخامت لایه

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-02]

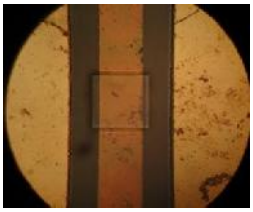
قربانی به مقدار مورد نظر (۳μm) نزدیک‌تر شود. پس از لایه‌نشانی لایه قربانی، این لایه توسط ماسک پایه‌ها لیتوگرافی نوری می‌شود (مرحله سوم). بعد از آن یک لایه آلومینیوم به ضخامت ۱μm، بعنوان لایه پل معلق، با روش تبخیر حرارتی توسط پرتوی الکترونی، لایه نشانی می‌گردد. در این مرحله باید دقت شود که دمای نمونه‌ها در حین لایه‌نشانی از حدود ۱۰۰°C بالاتر نرود، چراکه به دلیل وجود فوتورزسیت (بعنوان لایه قربانی) دمای بالاتر از این مقدار می‌تواند 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 سونش‌گر اسید فسفریک (۱:۱)، سونش می‌شود (مرحله چهارم). آخرین و مهمترین مرحله در ساخت سوئیچ، معلق‌سازی است. در این مرحله فوتورزسیت لایه قربانی برداشته شده و پل بصورت معلق روی خط مرکزی موجبرهم‌صفحه قرار می‌گیرد. برای این منظور ابتدا نمونه‌ها در محلول استون قرار داده شده تا فوتورزسیت لایه قربانی برداشته شود. سپس نمونه‌ها در ظرفی حاوی ایزوپروپانول (IPA) به مدت ۵ دقیقه قرار گرفته تا ایزوپروپانول جایگزین استون در زیر لایه پل معلق گردد. سپس، نمونه‌ها در ظرف ترت بوتانول مایع ($C_4H_{10}O$) گذاشته می‌شوند. ترت بوتانول ماده‌ای است که در دمای زیر ۲۰° C جامد بوده و در دمای ۲۳-۲۵° C ذوب می‌شود. نمونه‌ها از داخل محلول بیرون آورده شده، بطوری‌که روی آن‌ها هنوز بوتانول مایع وجود دارد. با پایین آوردن دمای نمونه‌ها، بوتانول جامد شده و نمونه‌ها بسرعت در اتاقک خلاء قرار داده می‌شوند؛ در اینصورت بوتانول یخ زده در زیر لایه پل معلق، تصعید شده و پل معلق آزاد می‌گردد (مرحله پنجم). تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ از مراحل فوق، در جدول (۴) آورده شده است.



۱- لایه‌نشانی، لیتوگرافی و سونش لایه طلای موجبرهم‌صفحه

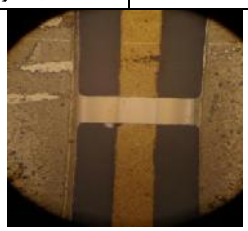


۲- لایه‌نشانی، لیتوگرافی و سونش لایه SiO_2 دی‌الکتریک



۳-لایه‌نشانی و لیتوگرافی لایه قربانی

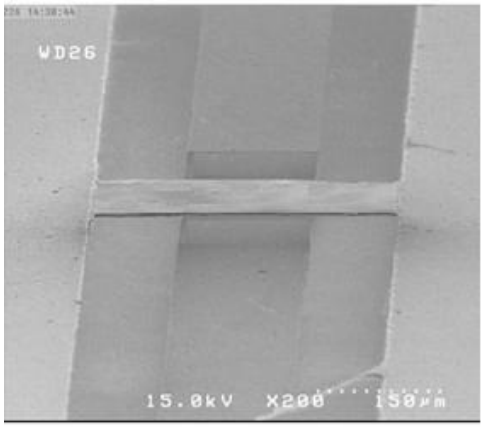
۴- لایه‌نشانی، لیتوگرافی و سونش لایه آلومینیوم پل معلق



۵- برداشتن لایه قربانی و معلق‌سازی پل

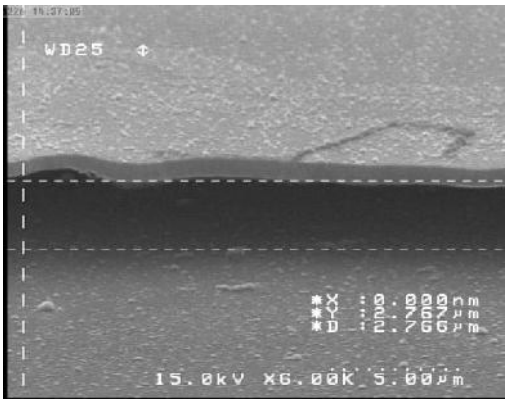
شکل(۱۰): تصاویر مراحل ساخت سوئیچ RF MEMS مورد نظر

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 می‌شود که فاصله هوایی بوجود آمده حدود ۲/۷۶۷nm بوده، که نزدیک مقدار طراحی شده است.



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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-02]

پس از پایان مراحل ساخت، بمنظور بدست آوردن مشخصات عملکردی سوئیچ، در حد امکانات موجود اندازه‌گیری‌هایی توسط تحلیلگر شبکه hp در رنج فرکانسی ۱۳GHz-۵ صورت گرفت. به دلیل در دسترس نبودن پروب‌های مخصوص اندازه‌گیری‌های موجبر هم‌صفحه (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 ۵۰Ω استفاده شد.

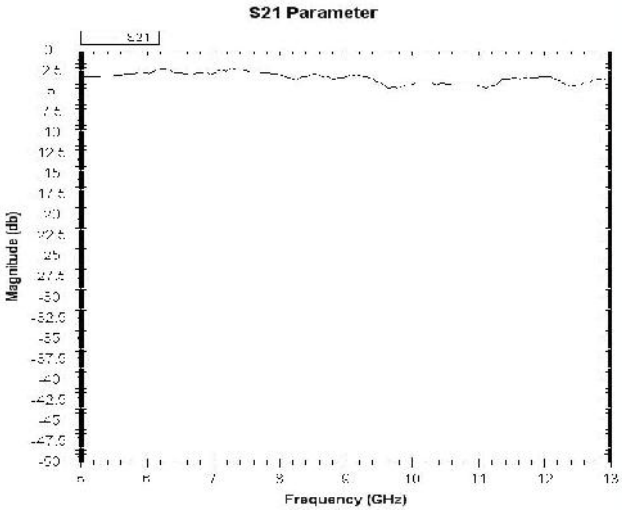
شکل (۱۳): روش پیشنهادی برای اندازه‌گیری پارامترهای سوئیچ

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

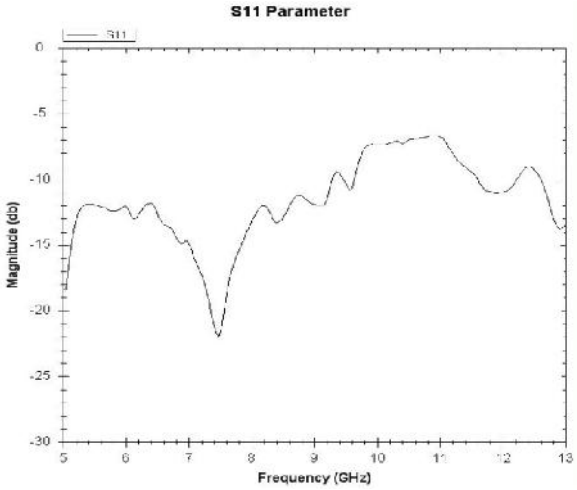
نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط این روش در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) آورده شده است. دیده می‌شود تلفات داخلی (S_{21}) حدود ۲/۵dB- و مقدار تلفات بازگشتی (S_{11}) نیز بیشتر از ۱۰dB- در رنج فرکانسی ۱۳GHz-۵ است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک موجبر هم‌صفحه با امپدانس مشخصه ۵۰Ω با استفاده از نرم‌افزار HFSS طراحی گردیده است. سپس یک سوئیچ



شکل (۱۴): تلفات داخلی سوئیچ مورد نظر



شکل (۱۵): تلفات بازگشتی سوئیچ مورد نظر

RF MEMS موازی بروی موجبر هم‌صفحه طراحی و ابعاد هندسی آن بدست آمده است. تحلیل و شبیه‌سازی الکترواستاتیکی و گذرای سوئیچ با استفاده از نرم‌افزار CoventorWare و بکارگیری روش المان محدود انجام شد، که ولتاژ پایین کشنده 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 ۶۰-۴۰ GHz دارد و تلفات داخلی در این باند حدود ۰/۸dB و تلفات بازگشتی نیز کمتر از ۹/۸dB است. سوئیچ در حالت خاموش نیز شبیه‌سازی شده، که نتیجه آن بیانگر عملکرد بسیار مناسب سوئیچ در حالت خاموش در این باند است، بطوریکه در این باند مقدار ایزولاسیون مناسب ۵۰dB و تلفات بازگشتی بسیار ناچیز حاصل شده است. با توجه به طراحی انجام گرفته، نمونه آزمایشگاهی سوئیچ RF

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-02]

MEMS ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته است، که مقدار تلفات داخلی ۲/۵dB و تلفات بازگشتی بیشتر از ۱۰dB 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, Fabrtication, 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 Switche.", 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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-02]