

طراحی و شبیه‌سازی یک سوئیچ خازنی موازی RF MEMS با ولتاژ تحریک کم، تلفات پایین و ایزولاسیون بالا

حمیدرضا انصاری^۱ سعید خسروآبادی^۲ یاسر مافی‌نژاد^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه بین‌المللی امام‌رضا (ع) - مشهد - ایران

hr.ansari@imamreza.ac.ir

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه بین‌المللی امام‌رضا (ع) - مشهد - ایران

khosroabadi@imamreza.ac.ir

۳- استادیار- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی سجاد - مشهد - ایران

y.mafi@sadjad.ac.ir

چکیده: بطور کلی سوئیچ‌های RF MEMS از نظر نوع اتصال شامل دو دسته خازنی و فلز-به-فلز می‌شوند. سوئیچ‌های خازنی RF MEMS بدلیل توانایی انتقال سیگنال با فرکانس بیشتر و توان بیشتر، سوئیچ‌های بهتری نسبت به سوئیچ‌های فلز-به-فلز محسوب می‌شوند. این مقاله یک سوئیچ RF MEMS خازنی موازی معلق را با ولتاژ تحریک پایین، نسبت خازنی بالا، زمان سوئیچینگ خوب و ایزولاسیون بالا ارائه می‌دهد. در این سوئیچ از پل آلومینیومی بدلیل داشتن مدول یانگ بالا و چگالی پایین استفاده شده است که به کاهش زمان سوئیچینگ کمک می‌کند. همچنین آلومینیوم رسانایی الکتریکی خوبی دارد که منجر به افزایش ایزولاسیون می‌شود. سوئیچ ارائه شده بر روی یک خط CPW با امپدانس ۵۰ اهم طراحی شده است و از ZrO_2 به عنوان لایه دی‌الکتریک استفاده شده است. روی سطح پل، ۲۴ حفره قرار داده شده است که منجر به کاهش ضریب دمپینگ و افزایش سرعت سوئیچینگ می‌شود. ولتاژ تحریک برای این سوئیچ برابر ۵/۷ ولت است و نسبت خازنی ۲۳۱ می‌باشد. تجزیه و تحلیل فرکانس رادیویی با استفاده از نرم‌افزار HFSS انجام شده است. نتایج بدست آمده، ایزولاسیون ۲۷- دسی‌بل، تلفات ورودی ۰/۲- دسی‌بل و تلفات بازگشتی ۲۲- دسی‌بل در فرکانس ۱۷ گیگاهرتز را نشان می‌دهد. همچنین زمان سوئیچینگ ۳۲ میکروثانیه بدست آمده است.

واژه‌های کلیدی: سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی، سوئیچ RF MEMS، ولتاژ تحریک کم، ایزولاسیون بالا، تلفات پایین، نسبت خازنی بالا، زمان سوئیچینگ خوب

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۱۶

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۰۹

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر سعید خسروآبادی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - مشهد - خیابان دانشگاه - دانشگاه ۲۱ - دانشگاه بین‌المللی امام‌رضا (ع) - دانشکده‌ی مهندسی برق

۱- مقدمه

ولت را نشان می‌دهد. Shekhar و همکاران [۱۸] سه سوئیچ RF MEMS با ضریب فنر کم ارائه کردند که ولتاژ ۴/۸-۶/۲ ولت و زمان سوئیچینگ ۳۷-۳۳ میکروثانیه بدست آمد. ایزولاسیون بهتر از ۳۰ دسی‌بل در فرکانس ۴۰ گیگاهرتز مشاهده شد.

ساختار پیشنهادی در این مقاله با کم کردن ضریب فنر، ولتاژ تحریک را کاهش می‌دهد. همچنین با استفاده از پیل آلومینیومی، جرم پل کاهش می‌یابد که موجب افزایش سرعت سوئیچینگ می‌شود. با قرار دادن ۲۴ حفره روی سطح پل، نیروی الکترواستاتیک کمتری برای پایین آمدن پل لازم است. یک طرف پل ثابت و طرف دیگر بالای خط انتقال به صورت معلق قرار گرفته است. فنر متصل به پل دارای چهار مارپیچ است که دستیابی به ولتاژ تحریک کمتر را فراهم می‌سازد. شبیه‌سازی‌های انجام گرفته در این مقاله با نرم افزار HFSS و COMSOL انجام گرفته است.

در بخش ۲ بطور کلی به نحوه طراحی ساختار سوئیچ ارائه شده با ذکر دقیق اندازه تمامی پارامترها پرداخته شده است. ابتدا در بخش ۲-۱ ولتاژ تحریک سوئیچ که یکی از مهمترین پارامترها برای بررسی عملکرد مطلوب سوئیچ محسوب می‌شود محاسبه گشته است سپس در بخش ۲-۲ فرکانس رزونانس که در تعیین زمان سوئیچینگ و آزادسازی موثر می‌باشد با استفاده از نرم افزار COMSOL نشان داده شده است و در بخش ۲-۳ این زمانها در دو نمودار به نمایش درآمده اند. از مهمترین پارامترهای موثر بر ایزولاسیون، نسبت خازنی است که در بخش ۲-۴ به آن پرداخته ایم و در انتها بخش ۲-۵ محاسبه پارامترهای S و تحلیل فرکانس بالا را نشان می‌دهد.

۲- ساختار سوئیچ پیشنهادی

شکل ۱ نشان‌دهنده ساختار سوئیچ طراحی شده شامل یک پل با ۲۴ حفره و دو فنر با چهار مارپیچ است. این سوئیچ روی یک خط CPW با ابعاد ۶۰/۹۰/۶۰ میکرومتر قرار گرفته و یک طرف سوئیچ روی زمین فیکس شده است. زیرلایه سیلیکونی و دی‌الکتریک ZrO_2 برای طراحی این سوئیچ استفاده شده اند. دلیل استفاده از ZrO_2 داشتن ضریب دی‌الکتریک بالا است که منجر به افزایش نسبت خازنی و بهبود عملکرد فرکانس بالا می‌شود. شکل ۲ ساختار فنر با چهار مارپیچ را نشان می‌دهد. شکل ۳-الف نمای کناری سوئیچ طراحی شده را در حالت خاموش نشان می‌دهد (زمانیکه هیچ ولتاژی به پل اعمال نشده است). این سوئیچ حاصل قرار گرفتن پیل آلومینیومی روی زیرلایه سیلیکونی می‌باشد. با اعمال ولتاژ ۵/۷ ولت به پل، سوئیچ در حالت روشن قرار می‌گیرد و اتصال بین لایه دی‌الکتریک و پل حاصل می‌شود. شکل ۳-ب سوئیچ طراحی شده را در حالت روشن نشان می‌دهد. در حالت خاموش به علت فاصله زیاد، مقدار خازن کم می‌باشد اما با قرار گرفتن سوئیچ در حالت روشن و کاهش فاصله، مقدار خازن افزایش می‌یابد. بنابراین سوئیچ به نیروی الکترواستاتیک کمتری برای پایین آمدن نیاز دارد. جدول ۱ ابعاد سوئیچ ارائه شده را نشان می‌دهد.

در چند سال اخیر، سوئیچ‌های RF MEMS ثابت کرده‌اند با مزایای بزرگی همچون ایزولاسیون بالا، تلفات کم، وزن پایین و اندازه کوچک جایگزین بسیار خوبی برای سوئیچ‌های GaAs FET و p-i-n diode هستند. این سوئیچ‌ها از دو بخش مکانیکی و الکتریکی تشکیل شده اند [۱-۳]. با وجود قابلیت‌های شگفت‌آور، سوئیچ‌های RF MEMS در هر لحظه برای بهبود ولتاژ تحریک، قابلیت اطمینان و ایزولاسیون در حال رقابت هستند. افزایش ولتاژ تحریک میدان الکتریکی شدیدی بین پل و خط انتقال ایجاد می‌کند. این ولتاژ بالا باعث تونل‌زنی بارها در لایه دی‌الکتریک می‌شود. این اتفاق منجر به خرابی دی‌الکتریک، کاهش عمر سوئیچ و پایین آمدن قابلیت اطمینان می‌گردد [۴-۹].

مکانیزم تحریک در سوئیچ‌های RF MEMS به چهار دسته تقسیم می‌گردد: الکترومغناطیسی، الکتروحرارتی، پیزوالکتریک و الکترواستاتیک. سوئیچ‌هایی که با نیروی الکترواستاتیک تحریک می‌شوند امتیازهای ویژه‌ای از جمله نیروی اتصال پایین، زمان سوئیچینگ کم و توان مصرفی پایین دارند. بنابراین در بین چهار مکانیزم تحریک گفته شده، استفاده از مکانیزم تحریک الکترواستاتیک نسبت به بقیه مکانیزم‌ها مطلوب‌تر است [۹، ۱۰].

سوئیچ‌های RF MEMS بر حسب نوع اتصال از دو نوع اتصال فلز-به-فلز و خازنی تشکیل می‌شوند. در سوئیچ‌های خازنی بدلیل وجود لایه دی‌الکتریک بین خط انتقال و پل، چه در حالت بالا و چه در حالت پایین، بین پل و خط انتقال هیچ اتصالی وجود نخواهد داشت. بدلیل همین فاصله، سوئیچ در حالت بالا و حالت پایین مثل یک خازن عمل می‌کند که با افزایش نسبت خازنی، سوئیچ عملکرد فرکانس بالای بهتری خواهد داشت. همچنین ناحیه اتصال باید بزرگ باشد تا سیگنال به خوبی از ورودی سیگنال به خروجی سیگنال انتقال یابد [۱۱-۱۳].

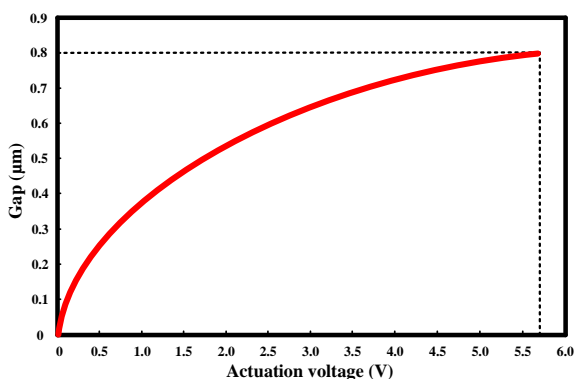
ولتاژ تحریک، زمان سوئیچینگ و عملکرد فرکانس بالا عوامل مهمی هستند که باید در طراحی هر سوئیچ RF MEMS مورد توجه قرار گیرند.

H. W. Yu و همکاران [۱۴] با استفاده از تحریک پیزوالکتریک و ساختار میکرو معلق، ولتاژ تحریک را به ۲ ولت کاهش دادند و همچنین ایزولاسیون بالایی را در فرکانس‌های بیشتر از ۵ گیگاهرتز بدست آوردند. Z. Deng و همکاران [۱۵] یک سوئیچ RF MEMS خازنی ارائه کردند که تحت سوئیچینگ داغ و شرایط ۱۰۰ میلی‌ولت به ولتاژ ۱۶ ولت و نسبت خازنی ۶/۸ می‌رسد و تحت شرایط ۳۰۰ میلی‌ولت به ولتاژ ۱۳ ولت کاهش پیدا می‌کند. Lakshmi و همکاران [۱۶] سه سوئیچ سری RF MEMS با اتصال اهمیک طراحی و شبیه‌سازی کردند که ولتاژ تحریک ۱۴-۶ ولت را بدست آمد و در فرکانس ۱۰ گیگاهرتز به ایزولاسیون ۷۶-۷۰ دسی‌بل دست یافتند. Y. Ma و همکاران [۱۷] یک طراحی، بهینه‌سازی و آنالیز جدید سوئیچ RF MEMS را ارائه کردند که نتیجه بدست آمده ولتاژ ۲/۹

۲-۱- ولتاژ تحریک

یکی از مهمترین پارامترها در طراحی و ساخت سوئیچ RF MEMS، ولتاژ تحریک می‌باشد. ولتاژ تحریک، پایین ترین ولتاژی است که با اعمال آن به پل، سوئیچ در حالت روشن قرار می‌گیرد. از معادله ۱ می‌توان ولتاژ تحریک را محاسبه نمود:

$$V_p = \sqrt{\frac{8Kg_0^3}{27A\epsilon_0}} \quad (1)$$



شکل (۴): تغییرات ولتاژ تحریک برای فاصله‌های مختلف در سوئیچ ارائه شده

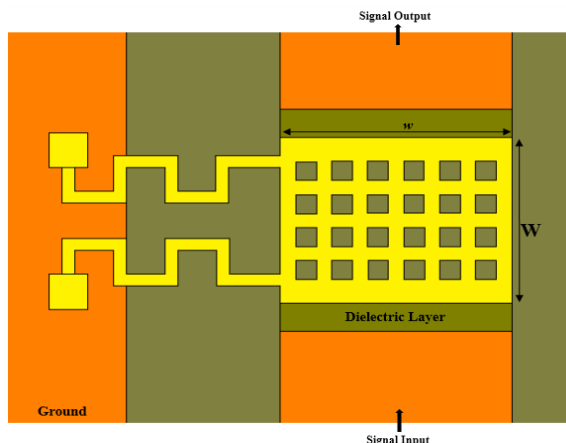
در این معادله K ضریب سختی فنر، g_0 فاصله بین دی‌الکتریک و پل و A سطح مقطع پل و خط انتقال را نشان می‌دهد. با توجه به معادله ۱ سه راه برای کاهش ولتاژ تحریک وجود دارد. راه اول کاهش g_0 است که منجر به ایجاد پدیده خودتحریکی و کاهش نسبت خازنی می‌شود و از این حیث مطلوب نیست. راه دوم افزایش A است که با این کار اندازه سوئیچ افزایش پیدا می‌کند و مناسب نیست. سومین و بهترین راه کاهش K است. طبق معادله ۲ ضریب سختی فنر به عواملی مثل مدول یانگ، عرض، طول و ضخامت فنر وابسته است. در سوئیچ ارائه شده از آلومینیوم به عنوان ماده تشکیل دهنده پل استفاده شده است که مزیت آن کاهش جرم سوئیچ است. K از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$K_{1,2} = \frac{EWt^3}{L^3} \quad (2)$$

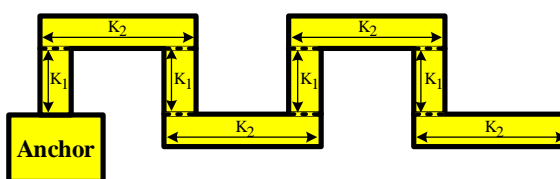
در این معادله E مدول یانگ، t ضخامت، w عرض و l طول هر قسمت از فنر می‌باشد که در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین برای محاسبه ضریب سختی فنر، K_{total} ، طبق فرمول‌های زیر خواهیم داشت:

$$\frac{1}{K_s} = \frac{4}{K_1} + \frac{4}{K_2} \quad (3)$$

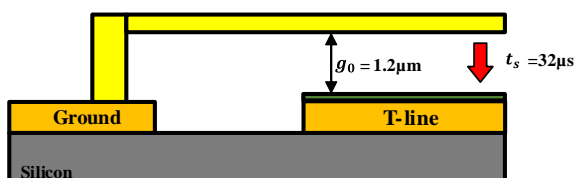
$$K_{total} = 2K_s \quad (4)$$



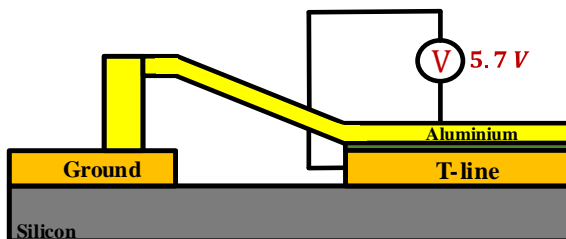
شکل (۱): نمای بالا از سوئیچ ارائه شده



شکل (۲): نمای بالا از ساختار فنر سوئیچ ارائه شده



(الف)

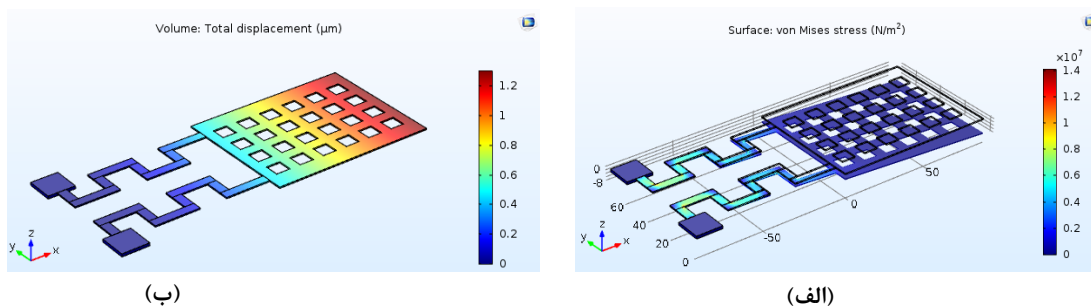


(ب)

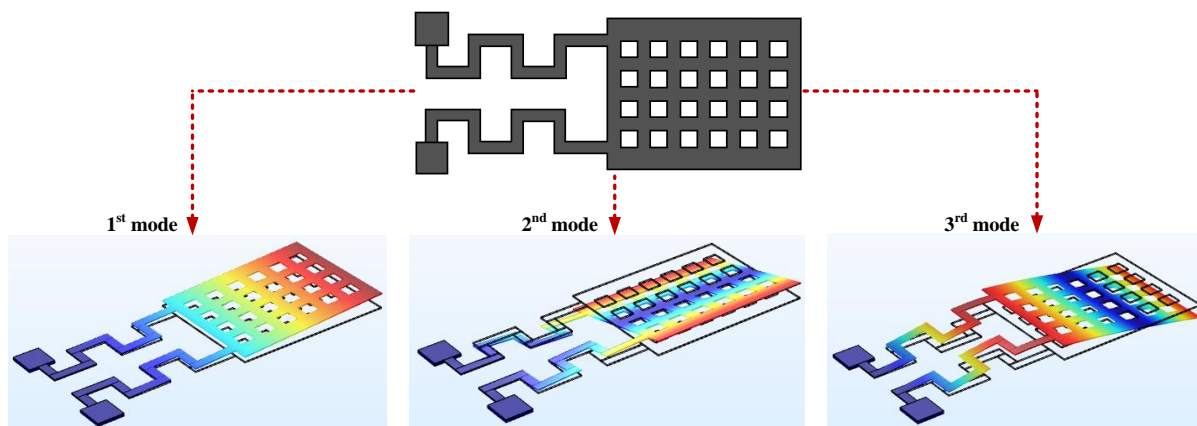
شکل (۳): (الف) نمای کناری از سوئیچ ارائه شده در حالت خاموش (ب) نمای کناری از سوئیچ ارائه شده در حالت روشن

جدول (۱): مشخصات سوئیچ ارائه شده

پارامتر	مقدار (میکرومتر)
ابعاد CPW	۶۰/۹۰/۶۰
ضخامت خط انتقال	۱
ضخامت پل	۰/۷
ابعاد حفره	۸×۸ (µm ²)
عرض پل MEMS	۹۰
طول پل MEMS	۷۰
ارتفاع زیرپایه	۲۰۰
فاصله بین خط انتقال و پل	۱/۲
ضخامت دی‌الکتریک	۰/۱



شکل (۵): (الف) نمای کلی از سوئیچ ارائه شده در حالت روشن (ب) مقدار جابجایی بعد از اعمال ولتاژ تحریک



شکل (۶): سه مُد اول فرکانس رزونانس سوئیچ ارائه شده

فرکانسی تاثیر زیادی می‌گذارد. مقدار فرکانس رزونانس از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (5)$$

در این معادله K ضریب سختی فنر و m جرم موثر است. آنالیز مودال نشان می‌دهد که جرم موثر برابر با $0.35-0.45$ جرم واقعی پل است و به اندازه الکتروود پایین کشیدن، ضخامت پل و ضریب سختی فنر وابسته است. فرکانس طبیعی بیشتر سوئیچهای RF MEMS که به صورت الکترواستاتیک تحریک می‌شوند بین $10-200$ کیلوهرتز است.

برای سوئیچ ارائه شده، فرکانس رزونانس مُد سوم برابر 73 کیلوهرتز می‌باشد. همانطور که در شکل ۶ دیده می‌شود از بین سه مُد اول فرکانس رزونانس، مُد سوم بدلیل شباهت حرکت در راستای جابجایی سوئیچ ارائه شده، در محاسبات صورت گرفته در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۳- زمان سوئیچینگ و آزادسازی

یکی از پارامترهای مهم در طراحی یک سوئیچ ایده‌آل، زمان سوئیچینگ می‌باشد. زمان سوئیچینگ و ولتاژ تحریک با یکدیگر رابطه عکس دارند. بنابراین برای داشتن یک سوئیچ ایده‌آل نمی‌توان یکی از

در شکل ۴ نمودار ولتاژ تحریک آورده شده است. زمانیکه ولتاژ تحریک به پل اعمال شود، پس از پیمودن دو سوم g_0 ، پل به لایه دی‌الکتیک متصل می‌شود. ولتاژ تحریک برای رسیدن پل از g_0 به دو سوم g_0 برابر با $5/7$ ولت است. جدول ۲ ابعاد و اندازه‌های فنر ارائه شده را نشان می‌دهد. همچنین رفتار دینامیکی سوئیچ در حالت پایین با استفاده از نرم‌افزار COMSOL در شکل ۵ به نمایش درآمده است.

جدول (۲): ابعاد فنر مارپیچ

ضخامت سختی فنر (میکرومتر)	طول (میکرومتر)	عرض (میکرومتر)	مدول یانگ (گیگاپاسکال)	ضریب سختی فنر K_1
0.7	10	5	70	K_1
0.7	25	5	70	K_2

۲-۲- فرکانس رزونانس

یکی از مهمترین پارامترها در سوئیچهای RF MEMS، فرکانس رزونانس است. دلیل اهمیت این پارامتر تاثیر مستقیم آن بر روی مواردی از جمله زمان سوئیچینگ، زمان آزادسازی و فاکتور کیفیت می‌باشد. بطور کلی فرکانس رزونانس بیانگر فرکانسی است که سیستم موردنظرمان بر حسب مشخصات خود، تمایل به نوسان در آن فرکانس را دارد. از این رو فرکانس رزونانس بر روی کاربرد سوئیچ در باندهای

۴-۲- نسبت خازنی

نسبت خازنی هرچه بیشتر باشد عملکرد فرکانس بالای بهتری خواهیم داشت. خازن در حالت پایین از معادله ۸ محاسبه می‌گردد:

$$C_{down} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{t_d} \quad (۸)$$

در این معادله ϵ_r ضریب دی‌الکتریک، t_d ضخامت دی‌الکتریک و A ناحیه اتصال می‌باشد. همچنین خازن در حالت بالا از معادله ۹ قابل محاسبه است:

$$C_{up} = C_{p-p} + C_f \quad (۹)$$

در اینجا C_f خازن میدان فرنگینگ است و بدلیل ناچیز بودن از آن صرف‌نظر می‌گردد. C_{p-p} خازن صفحه موازی است و از معادله ۱۰ بدست می‌آید:

$$C_{p-p} = \frac{\epsilon_0 A}{g_0 + \left(\frac{t_d}{\epsilon_r}\right)} \quad (۱۰)$$

همچنین نسبت خازنی با استفاده از معادله ۱۱ محاسبه می‌شود:

$$CR = \frac{C_{down}}{C_{up}} = \frac{\frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{t_d}}{\frac{\epsilon_0 A}{g_0 + \left(\frac{t_d}{\epsilon_r}\right)} + C_f} \quad (۱۱)$$

طبق معادله ۸ و معادله ۱۰ راه‌حل‌های متعددی برای افزایش نسبت خازنی وجود دارد. در این مقاله برای افزایش نسبت خازنی از ZrO_2 با ضخامت 1000 \AA به عنوان لایه دی‌الکتریک استفاده شده است. دلیل انتخاب ZrO_2 داشتن ضریب دی‌الکتریک بالا به اندازه ۲۳-۲۰ می‌باشد. نسبت خازنی برای سوئیچ ارائه شده برابر ۲۳۱ است.

۴-۵- تحلیل فرکانس بالا

برای محاسبه عملکرد فرکانس بالا، ساختار سوئیچ در نرم افزار HFSS شبیه‌سازی شده است. می‌توان پارامترهای S را از معادلات زیر بدست آورد:

$$S_{11} = -20 \log \left| \frac{-Z_h}{2Z_h + Z_0} \right| \quad (۱۲)$$

$$S_{21} = -20 \log \left| \frac{2Z_h}{2Z_h + Z_0} \right| \quad (۱۳)$$

در این معادله Z_0 امپدانس CPW و Z_h امپدانس پل است. S_{21} نشان‌دهنده ایزولاسیون در حالت پایین و تلفات ورودی در حالت بالا است. همچنین S_{11} نشان‌دهنده تلفات بازگشتی در حالت پایین می‌باشد. شکل ۸-الف ایزولاسیون و تلفات ورودی سوئیچ ارائه شده را نشان می‌دهد که به ترتیب برابر ۲۷-دسی‌بل و ۰/۲-دسی‌بل در فرکانس ۱۷ گیگاهرتز است. همچنین شکل ۸-ب تلفات بازگشتی سوئیچ ارائه شده را نشان می‌دهد که برابر ۲۲-دسی‌بل در فرکانس ۱۷

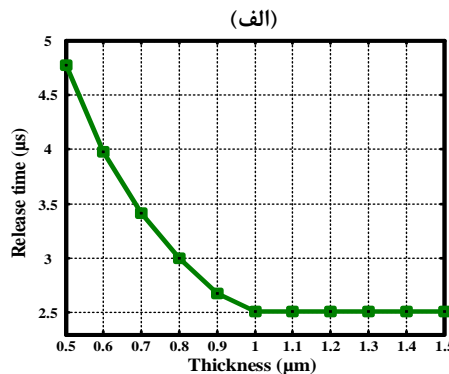
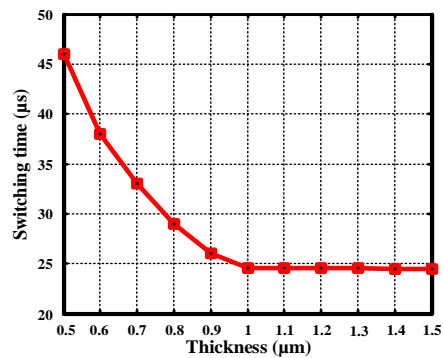
این دو پارامتر را بیش از حد بهبود داد. زمان سوئیچینگ از معادله ۶ محاسبه می‌گردد:

$$t_s = \frac{3.67V_p}{V_s \omega_0} \quad (۶)$$

در اینجا V_p ولتاژ تحریک، ω_0 فرکانس رزونانس و $V_s = 1.5V_p$ می‌باشد که برای افزایش سرعت سوئیچینگ به پل اعمال می‌شود. همچنین زمان آزادسازی یا بازگشت پل به حالت اولیه طبق فرمول زیر قابل محاسبه است:

$$t_{pu} = \frac{1}{4 \times 2\pi \times \omega_0} \quad (۷)$$

در این معادله t_{pu} زمان بالا آمدن و ω_0 فرکانس رزونانس است. طبق معادله ۶ دو راه برای کاهش زمان سوئیچینگ وجود دارد: راه اول کاهش V_p و راه دوم افزایش ω_0 می‌باشد. با استفاده از معادله ۵ می‌فهمیم که با افزایش K ، مقدار ω_0 زیاد می‌شود اما براساس معادله ولتاژ تحریک نیز افزایش می‌یابد که با راه اول در تناقض است. بنابراین بهترین راه برای کاهش زمان سوئیچینگ کاهش m است. در این مقاله برای کاهش m از فلز آلومینیوم استفاده شده است. چگالی آلومینیوم ۲/۷ گرم بر سانتیمتر مکعب می‌باشد که در مقایسه با طلا مقدار کمتری دارد. زمان سوئیچینگ برای سوئیچ ارائه شده در این مقاله ۳۲ میکروثانیه و زمان آزادسازی ۳/۵ میکروثانیه است. در شکل ۷-الف و ۷-ب به ترتیب زمان سوئیچینگ و زمان آزادسازی برای سوئیچ ارائه شده در مقابل ضخامت‌های مختلف پل مقایسه شده است.



شکل (۷): (الف) مقایسه زمان سوئیچینگ و (ب) زمان آزادسازی برای ضخامت‌های مختلف پل

جدول (۳): مقایسه ساختار ارائه شده با کارهای قبلی

[۲۲]	[۲۱]	[۲۰]	[۱۹]	این کار	
۲۰	۲۰	۲۳/۶	بالای ۳۰	۵/۷	ولتاژ تحریک (ولت)
۲۰- در ۲۴ گیگاهرتز	----	۳۵- در ۴۰ گیگاهرتز	----	۲۲- در ۱۷ گیگاهرتز	تلفات بازگشتی (دسی‌بل)
۱۸- در ۲۴ گیگاهرتز	۵۱- در ۲ گیگاهرتز	۳۵- در ۴۰ گیگاهرتز	۲۷- در ۳۰ گیگاهرتز	۲۷- در ۱۷ گیگاهرتز	ایزولاسیون (دسی‌بل)
۰/۹- در ۲۴ گیگاهرتز	۰/۱۲۵- در ۱۷ گیگاهرتز	۰/۶۸- در ۴۰ گیگاهرتز	۰/۴- در ۳۰ گیگاهرتز	۰/۲- در ۱۷ گیگاهرتز	تلفات ورودی (دسی‌بل)

خازنی برابر ۲۳۱ بدست آمد که منجر به عملکرد فرکانس بالای بسیار خوبی گشت.

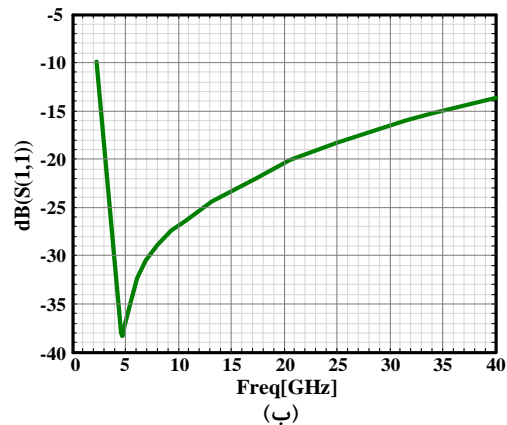
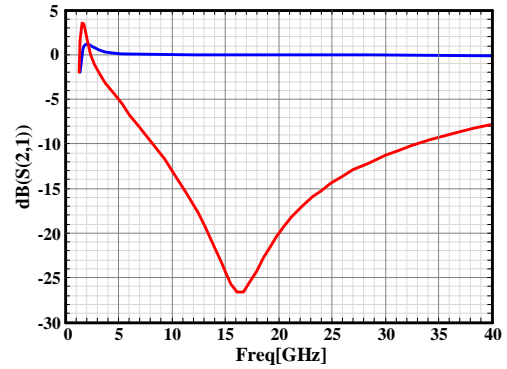
بطور کلی در سوئیچ‌های RF MEMS برای داشتن پارامترهای S مطلوب لازم است که تلفات بازگشتی و ایزولاسیون مقداری کمتر از ۱۰- دسی‌بل و تلفات ورودی مقداری مابین ۰ و ۱- دسی‌بل داشته باشد. در این مقاله بیشترین ایزولاسیون برابر ۲۷- دسی‌بل در فرکانس ۱۷ گیگاهرتز اتفاق می‌افتد. تلفات بازگشتی و تلفات ورودی به ترتیب برابر ۲۲- دسی‌بل و ۰/۲- دسی‌بل در ۱۷ گیگاهرتز بدست می‌آیند که با توجه مطلب ذکر شده کارایی بسیار خوبی برای استفاده به عنوان سوئیچ در مدارات با فرکانس بالا خواهد داشت.

سپاسگزاری

نویسنده این مقاله نهایت تشکر و قدردانی را از جناب آقای مهندس احسان حیدری دارد که در تمامی مراحل، با تلاش و کمک‌هایشان سهمی وصف نشدنی در آمادگی این مقاله داشتند.

مراجع

- [1] Rebeiz, G. M., Muldavin, J. B., "RF MEMS switches and switch circuits", IEEE Microwave Magazine, Vol. 2, No. 4, pp. 59-71, 2001.
- [2] سعید دل آرام فریمانی، حسن حاج‌قاسم، علیرضا عرفانیان، مجیدرضا علی‌احمدی، "طراحی، شبیه‌سازی و ساخت سوئیچ خازنی RF MEMS بر روی بستر آلومینا"، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، جلد ۱۲، شماره ۲، صفحه ۱۵-۲۴، سال ۱۳۹۴.
- [3] Mahlooji, M. R., Koohsorkhi, J., "Simulation and Derivation of Deflection Equation for Suspended Diaphragm for MEMS Application Using Kirchhoff-Love Theory", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol 15 (4), pp. 21-28, 2019.
- [4] Wibbeler, J., Pfeifer, G., Hietschold, M., "Parasitic charging of dielectric surfaces in capacitive microelectromechanical systems (MEMS)", Sens. Actuators A, Phys., Vol. 71, No. 1, pp. 74-80, 1998.
- [5] Goldsmith, C., et al., "Lifetime characterization of capacitive RF MEMS switches", in IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., Vol. 1, pp. 227-230, 2001.
- [6] Tazzoli, A., Peretti, V., Meneghesso, G., "Electrostatic discharge and cycling effects on ohmic and capacitive RF-MEMS switches", IEEE Trans. Device Mater. Rel., Vol. 7, No. 3, pp. 429-437, 2007.



شکل (۸): (الف) شبیه‌سازی ایزولاسیون و تلفات ورودی (ب) شبیه‌سازی تلفات بازگشتی برای سوئیچ ارائه شده

گیگاهرتز می‌باشد. برای اینکه نشان داده شود که سوئیچ ارائه نتایج خوبی را به عمل آورده است در جدول ۳، این ساختار را با چند نمونه مشابه مقایسه کرده ایم.

۳- نتیجه‌گیری

دو پارامتر مهم و تأثیرگذار در ساخت و شبیه‌سازی سوئیچ‌های RF MEMS، ولتاژ تحریک و زمان سوئیچینگ می‌باشد. این دو پارامتر با یکدیگر رابطه عکس دارند، بنابراین برای داشتن یک سوئیچ ایده‌آل باید هر دو پارامتر را بهبود ببخشیم. در این مقاله یک سوئیچ RF MEMS با فنر ماریچ برای کاهش ضریب سختی فنر و ۲۴ حفره داخل پل MEMS برای کاهش جرم پل طراحی شده است. برای پل MEMS آلومینیوم بدلیل جرم پایین و مدول یانگ بالا استفاده شده است. ولتاژ تحریک ۵/۷ ولت و زمان سوئیچینگ ۳۲ میکروثانیه بدست آمد. نسبت

pull-in voltage”, *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, Vol. 93, pp. 661-670, 2017.

زیر نویس‌ها

¹ Insertion loss

² Return loss

- [7] Mellé, S., et al., “Reliability modeling of capacitive RF MEMS”, *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, Vol. 53, No. 11, pp. 3482–3488, 2005.
- [8] Persano, A., Cola, A., De Angelis, G., Taurino, A., Siciliano, P., Quaranta, F., “Capacitive RF MEMS switches with tantalum-based materials”, *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 20, No. 2, pp. 365–370, 2011.
- [9] Van Spengen, W. M., “Capacitive RF MEMS switch dielectric charging and reliability: A critical review with recommendations”, *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 22, No. 7, 2012.
- [10] Rebeiz, G. M., *RF MEMS: Theory, Design, and Technology* 3rd ed, New Jersey, John Wiley & Sons Inc, 2003.
- [11] Jaibir, S., Nagendra, K., Amitava, D., “Fabrication of low pull-in voltage RF MEMS switches on glass substrate in recessed CPW configuration for V-band application”, in *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 22, No. 2, 2012.
- [12] Yu, A. B., Liu, A. Q., Zhang, Q. X., Alphones, A., Zhu, L., Shacklock, A. P., “Improvement of isolation for MEMS capacitive switch via membrane planarization”, in *Sensors Actuators A Phys*, Vol. 119, No. 1, pp. 206–213, 2005.
- [13] Soulimane, S., Casset, F., Charvet, P. L., Maeder, C., Aid, M., “Planarization of photoresist sacrificial layer for mems fabrication”, *Microelectronic Engineering*, Vol. 84, No.5, pp. 1398-1400, 2007.
- [14] Yu, H. W., Kim, J. M., “Low-voltage micromechanical RF switch based on a piezoelectric micro-cantilever integrated with a transmission line”, *J. Korean Phys. Soc.*, Vol. 67, No. 11, pp. 1942–1946, 2015.
- [15] Deng, Z., Wei, H., Fan, S., Gan, J., “Design and analysis a novel RF MEMS switched capacitor for low pull-in voltage application”, *Microsyst. Technol.*, Vol. 22, No. 8, pp. 2141–2149, 2016.
- [16] Lakshmi, S., Manohar, P., Naga, S. P., “Optimization of structures of DC RF MEMS series switches for low actuation”, *Microsyst. Technol.*, Vol. 23, No. 7, pp. 2371–2379, 2017.
- [17] Ma, L. Y., Nordin, A. N., Soin, N., “A novel design of a low-voltage low-loss T-match RF-MEMS capacitive switch”, *Microsyst. Technol.*, Vol. 24, No. 1, pp. 561-574, 2018.
- [18] Shekhar, S., Vinoy, K. J., Ananthasuresh, G. K., “Surface- Micromachined Capacitive RF Switches with Low Actuation Voltage and Steady Contact”, *J. Microelectromechanical Syst.*, Vol. 26, No. 3, pp. 643–652, 2017.
- [19] Mahameed, R., Rebeiz, G. M., “RF MEMS Capacitive Switches for Wide Temperature Range Applications Using a Standard Thin-Film Process”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 59, No. 7, pp. 1746-1752, 2011.
- [20] Badia, M. F., Buitrago, E., Ionescu, A. M., “RF MEMS Shunt Capacitive Switches Using AlN Compared to Si3N4 Dielectric”, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 21, No. 5, pp. 1229-1240, 2012.
- [21] Kim, C. H., “Mechanically Coupled Low-Voltage Electrostatic Resistive RF Multithrow Switch”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 59, No. 2, pp. 1114-1122, 2012.
- [22] Mafinejad, Y., Kouzani, A. Z., Mafinezhad, K., Hosseinezhad, R., “Low insertion loss and high isolation capacitive RF MEMS switch with low