



دانشکده مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد

عنوان پایان نامه:

طراحی و شبیه سازی یک سوئیچ فرکانس بالای MEMS

با ولتاژ تحریک پایین

در بازه فرکانسی ۲۰ تا ۴۰ گیگاهرتز

نگارش:

پروین بهمن یار

استاد راهنما:

آقای دکتر خلیل مافی نژاد

شهریور ۱۳۸۹

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد

عنوان پایان نامه:

طراحی و شبیه سازی یک سوئیچ فرکانس بالای MEMS

با ولتاژ تحریک پایین

در بازه فرکانسی ۲۰ تا ۴۰ گیگاهرتز

نگارش:

پروین بهمن یار

استاد راهنما:

آقای دکتر خلیل مافی نژاد

شهریور ۱۳۸۹

## اظهارنامه

اینجانب ..... دانشجوی دوره دکتری/کارشناسی ارشد رشته .....  
دانشگاه ..... دانشگاه فردوسی مشهد نویسنده رساله/پایان نامه  
..... تحت راهنمایی ..... متعهد

می‌شوم:

- تحقیقات در این رساله/پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در رساله/پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه فردوسی مشهد » و یا « Ferdowsi University of Mashhad » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله/پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از رساله/پایان نامه رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله/پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله/پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در رساله/پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

به نام خدا



دانشکده مهندسی

عنوان پایان نامه:

طراحی و شبیه سازی سوئیچ خازنی MEMS با ولتاژ تحریک پایین در بازه فرکانسی ۲۰ تا ۴۰ گیگاهرتز

نگارش:

پروین بهمن یار

کمیته ممتحنین:

امضا: .....

استاد راهنما: جناب آقای دکتر .....

امضا: .....

استاد دفاع: جناب آقای دکتر .....

امضا: .....

استاد دفاع: جناب آقای دکتر .....

تقدیم به

مادر مهربان

و

پدر عزیزم

که همواره در تمام مراحل زندگی حامی و پشتیبان من بوده اند...

## سپاسگزاری:

برخود لازم می دانم از استاد ارجمند راهنما، جناب آقای دکتر خلیل مافی نژاد، به جهت حمایت و راهنمایی های سودمند و ارزنده قدردانی نمایم.

همچنین از جناب آقای دکتر کشمیری و آقای دکتر ناصح، اساتید محترم دفاع، به دلیل مطالعه پایان نامه سپاسگزارم.

بخشی از شبیه سازی ها در این پایان نامه به وسیله نرم افزار EM3DS انجام گرفته است. از آقای پروفیسور مارکو فارینا به جهت در اختیار گذاشتن این نرم افزار متشکرم.

همچنین از خواهرم، خانم مهندس یاسمین بهمن یار و دوست عزیزم، خانم مهندس سپیده جعفر نژاد که در بخش تحلیل مکانیکی این تحقیق مرا راهنمایی کرده اند، ممنونم و برای ایشان آرزوی موفقیت روز افزون را دارم.

## چکیده:

رشد روز افزون به کارگیری سیستم های فرکانس بالا، نیاز به مدارها و سیستم های کم هزینه تر و کوچک تر با مشخصات فرکانس بالای بهتر را بیشتر کرده است. سوئیچ های میکروالکترومکانیکی، یکی از انواع سوئیچ های فرکانس بالا هستند که در سال های اخیر به دلیل ویژگی های فرکانس بالای ارزشمند از جمله ایزولاسیون بالا، تلفات کم، خطی بودن، قابلیت ساخت با حجم و هزینه کم و قابلیت مجتمع شدن با تکنولوژی ارزان قیمت CMOS، در بسیاری از سیستم های الکتریکی جایگزین سوئیچ های ترانزیستوری، دیودی و همچنین سوئیچ های پروزن مکانیکی شده اند. سوئیچ های میکروالکترومکانیکی الکترواستاتیک معمولاً برای تحریک به ولتاژ بالا احتیاج دارند؛ به همین دلیل در مدارهای مجتمع با ولتاژ کاری پایین، به مبدل های ولتاژ با تلفات و حجم زیاد، نیاز دارند و به سادگی قابل مجتمع شدن نیستند. در این تحقیق انواع سوئیچ های میکروالکترومکانیکی معرفی و ساختارهای مختلف گزارش شده، برای کاهش ولتاژ تحریک بررسی شده اند. ملاحظات طراحی برای کاهش ولتاژ تحریک و افزایش قابلیت اطمینان به تفصیل مورد بحث قرار گرفته اند. علاوه بر این یک سوئیچ میکروالکترومکانیکی الکترواستاتیک با سطوح تحریک بزرگ و جداگانه، برای کاربرد در باند فرکانسی ۲۰ تا ۴۰ گیگاهرتز، با ولتاژ تحریک کمتر از ۱۰ ولت و ضریب فنر بالا ارائه شده است. سوئیچ از نوع خازنی موازی با دی الکتریک سیلیکون نیتراید با ضریب دی الکتریک ۷/۶ است. ضریب فنر سوئیچ ۱۸ نیوتن بر متر محاسبه شده است که قابلیت اطمینان سوئیچ را تضمین می کند. علاوه بر این عملکرد الکترومغناطیسی و مکانیکی سوئیچ به ترتیب با استفاده از نرم افزار های EM3DS و ANSYS شبیه سازی و نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از تحلیل دستی مقایسه شده اند.

در انتها عملکرد فرکانس بالای سوئیچ با بکارگیری مدل  $\pi$  بهینه شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهند که در سوئیچ با ساختار  $\pi$  پارامترهای فرکانس بالا نسبت به سوئیچ اولیه بسیار بهبود پیدا کرده اند. سوئیچ طراحی شده با مدل  $\pi$  دارای ایزولاسیون نزدیک به ۲۰ دسی بل در فرکانس ۲۰ گیگاهرتز و ۳۹ دسی بل در فرکانس ۴۰ گیگاهرتز است. همچنین تلفات حالت هدایت و تلفات بازگشتی در حالت عدم تحریک به ترتیب کمتر از ۰/۳ دسی بل و بیشتر از ۱۶ دسی بل می باشد.

نتیجه شبیه سازی الکترومکانیکی نشان می دهد که تنش باقی مانده در بازو در حدود ۶ مگاپاسکال و در حجم بسیار کوچکی حداکثر به ۱۰ مگاپاسکال می رسد. همچنین ولتاژ تحریک با شبیه سازی ANSYS، ۷/۸ ولت بدست آمده است.



فهرست:

پیش گفتار

فصل اول: آشنایی با سوئیچ فرکانس بالای MEMS

۱-۱ مقدمه ای بر تئوری کلیدزنی

۲-۱ انواع سوئیچ های فرکانس بالا

۱-۲-۱ سوئیچ از نوع دیودهای پیوند PN

۲-۲-۱ سوئیچ از نوع ترانزیستورهای FET

۳-۱ معرفی سوئیچ های میکرو الکترومکانیکی فرکانس بالا

۴-۱ ساختار و طبقه بندی انواع سوئیچ های میکروالکترومکانیکی فرکانس بالا

۱-۴-۱ روش تحریک

۲-۴-۱ فرم اتصال

۱-۲-۴-۱ سوئیچ با اتصال فلز با فلز

۲-۲-۴-۱ سوئیچ های خازنی

۳-۴-۱ جهت اتصال

۴-۴-۱ ساختار

۵-۱ بررسی مدل الکتریکی انواع سوئیچ های MEMS الکترواستاتیکی

۱-۵-۱ سوئیچ موازی خازنی

۲-۵-۱ سوئیچ موازی با اتصال فلزی

۳-۵-۱ سوئیچ سری با اتصال فلزی و خازنی

۶-۱ بررسی مدل مکانیکی سوئیچ MEMS الکترواستاتیکی

۷-۱ ویژگی های سوئیچ میکروالکترومکانیکی

۱-۷-۱ قابلیت ساخت با هزینه کم

۲-۷-۱ مصرف توان نزدیک به صفر

۳-۷-۱ ایزولاسیون بسیار بالا

..... ۲۹	۴-۷-۱ تلفات حالت وصل پایین
..... ۲۹	۵-۷-۱ خطی بودن و پارامترهای مدولاسیون داخلی
..... ۲۹	۶-۷-۱ جریان یا ولتاژ راه اندازی بالا
..... ۲۹	۷-۷-۱ زمان کلیدزنی زیاد
..... ۳۰	۸-۱ تکنیک های ساخت سوئیچ MEMS
..... ۳۰	۹-۱ مقایسه سوئیچ های فرکانس بالا از نظر ضریب شایستگی
..... ۳۱	۱-۹-۱ محاسبه ضریب شایستگی در یک نیمه هادی
..... ۳۲	۲-۹-۱ محاسبه ضریب شایستگی در سوئیچ های FET
..... ۳۲	۳-۹-۱ محاسبه ضریب شایستگی در دیود پیوند PN
..... ۳۳	۴-۹-۱ محاسبه ضریب شایستگی در سوئیچ میکروالکترو مکانیکی
..... ۳۴	۱۰-۱ نگرانی ها در سوئیچ های میکروالکترو مکانیکی فرکانس بالا
..... ۳۶	۱۱-۱ موفقیت های تجاری سیستم های میکروالکترو مکانیکی
..... ۳۷	۱۲-۱ جمع بندی فصل
..... ۳۸	<b>فصل دوم: بررسی مقالات و طرحهای ارائه شده گذشته از سوئیچ های میکروالکترو مکانیکی الکترواستاتیک</b>
..... ۳۹	۱-۲ طراحی سوئیچ فرکانس بالای MEMS با ولتاژ تحریک پایین
..... ۴۳	۲-۲ سوئیچ پایدار MEMS با ولتاژ تحریک پایین
..... ۴۵	۳-۲ ساختار ولتاژ پایین برای سوئیچ های خازنی فرکانس بالا
..... ۴۷	۴-۲ سوئیچ خازنی فرکانس بالای MEMS ساخته شده بر زیرلایه سیلیکون با تلفات کم
..... ۴۹	۵-۲ بهینه سازی پارامترهای سوئیچ متقارن چند وضعیتی فرکانس بالای MEMS برای باند فرکانس X
..... ۵۲	۶-۲ سوئیچ MEMS فرکانس بالا قابل انعطاف با سیستم ضد اصطکاک
..... ۵۴	<b>فصل سوم: طراحی و شبیه سازی سوئیچ خازنی موازی فرکانس بالای MEMS با ولتاژ تحریک پایین</b>
..... ۵۶	۱-۳ روند طراحی
..... ۵۶	۱-۱-۳ طراحی خط انتقال
..... ۵۷	۲-۱-۳ طراحی پارامترهای سوئیچ

..... ۵۸	۲-۳ ملاحظات طراحی برای انتخاب بازو
..... ۵۸	۱-۲-۳ جنس بازو
..... ۵۹	۲-۲-۳ ضخامت بازو
..... ۶۰	۳-۲-۳ عرض بازو
..... ۶۱	۳-۳ ملاحظات طراحی برای انتخاب دی الکتریک
..... ۶۱	۱-۳-۳ جنس دی الکتریک
..... ۶۲	۲-۳-۳ ضخامت دی الکتریک
..... ۶۲	۴-۳ ملاحظات طراحی برای انتخاب ثابت فنر و ولتاژ تحریک
..... ۶۶	۵-۳ ساختار پیشنهادی سوئیچ
..... ۶۷	۶-۳ محاسبه ولتاژ تحریک در سوئیچ طراحی شده
..... ۷۱	۷-۳ بررسی پارامترهای مکانیکی سوئیچ طراحی شده
..... ۷۱	۸-۳ نتایج شبیه سازی سوئیچ طراحی شده
..... ۷۲	۱-۸-۳ شبیه سازی الکترومغناطیسی
..... ۷۶	۲-۸-۳ شبیه سازی الکترومکانیکی
..... ۸۱	۹-۳ بهینه کردن عملکرد سوئیچ طراحی شده با استفاده از مدل $\pi$
..... ۸۵	۱-۹-۳ تاثیر طول خط انتقال میانی در عملکرد سوئیچ با مدل $\pi$
..... ۸۷	۲-۹-۳ تاثیر افزایش ثابت دی الکتریک در عملکرد سوئیچ با مدل $\pi$
..... ۸۹	۱۰-۳ خلاصه ای از مشخصات سوئیچ طراحی شده
..... ۹۱	نتیجه گیری
..... ۹۳	پیوست ۱: قوانین ساخت MUMPS
..... ۹۴	پیوست ۲: آشنایی با نرم افزار EM3DS
..... ۹۶	مراجع

## فهرست شکل ها:

.....۱۲	شکل ۱-۱ نمایش سوئیچ سری و موازی در یک مدار الکتریکی
.....۱۲	شکل ۲-۱ مدل مدار سوئیچینگ غیر ایده آل به وسیله امپدانس متغیر $Z_d$
.....۱۴	شکل ۳-۱ مشخصه ولتاژ- جریان یک دیود پیوند
.....۱۴	شکل ۴-۱ مدار معادل دیود پیوند PN در حالت بسته (On) و باز (off)
.....۱۵	شکل ۵-۱ مشخصه ولتاژ جریان یک ترانزیستور FET
.....۱۵	شکل ۶-۱ برش عرضی ترانزیستور FET گالیم آرسنیک در دو حالت کلیدزنی باز و بسته و مدار معادل آن
.....۱۶	شکل ۷-۱ مدار معادل الکتریکی سوئیچ FET
.....۱۹	شکل ۸-۱ سوئیچ میکروالکترو مکانیکی دو سر ثابت
.....۱۹	شکل ۹-۱ سوئیچ میکروالکترو مکانیکی سری اهرمی
.....۲۰	شکل ۱۰-۱ سوئیچ چرخشی
.....۲۱	شکل ۱۱-۱ نمایش یک سوئیچ موازی به صورت برش عرضی و نمایش بیرونی و مدار معادل الکتریکی
.....۲۳	شکل ۱۲-۱ الف) نمایش یک سوئیچ موازی با اتصال اهمی با دو الکتروود برای جذب بازو ب) مدل الکتریکی سوئیچ در حالت بسته
.....۲۴	شکل ۱۳-۱ سوئیچ سری با اتصال فلزی الف) نوع اهرمی، ب) نوع دو سر ثابت ج) برش عرضی و د) مدل الکتریکی آن
.....۲۶	شکل ۱۴-۱ مدل ساده شده سوئیچ دو سر ثابت MEMS در حالت باز و بسته
.....۳۱	شکل ۱۵-۱ حجم کوچک از ماده نیمه رسانا
.....۳۶	شکل ۱۶-۱ نتایج آمارگیری رشد MEMS در بازار تجاری جهانی
.....۴۰	شکل ۱-۲ ساختار سوئیچ [22, 24]
.....۴۱	شکل ۲-۲ نمایش N پیچ و خم [24]
.....۴۲	شکل ۳-۲ خازن بر حسب ولتاژ پایین آورنده در سوئیچ هایی با تعداد پیچ و خم های متفاوت [24]
.....۴۴	شکل ۴-۲ برش عرضی سوئیچ [18]
.....۴۴	شکل ۵-۲ ساختار سوئیچ طراحی شده [18]
.....۴۵	شکل ۶-۲ ساختار سوئیچ MEMS طراحی شده با دو بازوی متحرک [25]
.....۴۶	شکل ۷-۲ جابه جایی بازوها در سوئیچ MEMS طراحی شده با دو بازوی متحرک [25]

شکل ۲-۸ ساختار سوئیچ طراحی شده. شکل سمت راست: برش عرضی، شکل مرکزی: نمایش کلی سوئیچ، شکل چپ: تصویر میکروسکوپی  
[23] ۴۸.....

شکل ۲-۹ نمایش سوئیچ طراحی شده [23] ۴۸.....

شکل ۲-۱۰ ساختار سوئیچ MEMS طراحی شده سه وضعیتی STS [26] ۵۰.....

شکل ۲-۱۱ (a) نمایش سه بعدی STS و (b) سطح هم پوشان STS [26] ۵۰.....

شکل ۲-۱۲ اثر تغییر طول اهرم های اتصال بر پارامترهای پراکندگی [26] ۵۱.....

شکل ۲-۱۳ پارامترهای پراکندگی در دو سوئیچ با بازوهای متفاوت [26] ۵۱.....

شکل ۲-۱۴ پارامترهای پراکندگی در دو سوئیچ با دی الکتریک های متفاوت [26] ۵۲.....

شکل ۲-۱۵ ساختار سوئیچ طراحی شده قابل انعطاف در سه حالت (a) استراحت، (b) بسته و (c) باز [21] ۵۳.....

شکل ۲-۱۶ ساختار سوئیچ ساخته شده [21] ۵۳.....

شکل ۲-۱۷ شبیه سازی سوئیچ طراحی شده در حالت عدم تحریک. راست) با بال ها و چپ) بدون بال ها [21] ۵۴.....

شکل ۳-۱ خط انتقال CPW. خط مرکزی خط سیگنال و دو خط بیرونی خطوط زمین هستند ۵۷.....

شکل ۳-۲ نمای بالا از مدل اولیه سوئیچ موازی خازنی MEMS ۵۸.....

شکل ۳-۳ ایزولاسیون بر حسب خازن  $C_d$  در فرکانس ۲۰ گیگا هرتز ۶۴.....

شکل ۳-۴ ماکزیمم ثابت فنر بر حسب ابعاد سطح تماس در ولتاژ تحریک ۶,۵ ولت ۶۵.....

شکل ۳-۵ ساختار سوئیچ طراحی شده ۶۷.....

شکل ۳-۶ دو ساختار پیشنهادی سوئیچ طراحی شده برای اتصال بخش میانی به بخش تحریک. راست: با یک پایه اتصال، چپ: با دو پایه اتصال ۶۷.....

شکل ۳-۷ نمودار ثابت فنر بر حسب طول بازو در تنش های مختلف ۶۸.....

شکل ۳-۸ نمایش سوئیچ طراحی شده در حالت باز (شکل های سمت راست) و بسته (شکل های سمت چپ) از زوایای مختلف. به ترتیب از بالا به پایین: نمایش بالا، نمایش جانبی و نمایش سه بعدی ۷۰.....

شکل ۳-۹ ولتاژ تحریک بر حسب طول بازو در تنش های باقی مانده مختلف ۷۱.....

شکل ۳-۱۰ تلفات بازگشتی سوئیچ طراحی شده هنگام عدم اعمال ولتاژ تحریک (باز) ۷۳.....

شکل ۳-۱۱ تلفات حالت هدایت سوئیچ طراحی شده در هنگام عدم اعمال ولتاژ تحریک (باز) ۷۳.....

شکل ۳-۱۲ تلفات بازگشتی سوئیچ طراحی شده در هنگام اعمال ولتاژ تحریک (بسته) ۷۴.....

شکل ۳-۱۳ ایزولاسیون سوئیچ طراحی شده در هنگام اعمال ولتاژ تحریک (بسته) ۷۴.....

.....۷۵.....	شکل ۱۴-۳ نمودار اسمیت سوئیچ طراحی شده در حالت بسته
.....۷۵.....	شکل ۱۵-۳ چگالی جریان سوئیچ طراحی شده در حالت بسته در فرکانس ۳۰ گیگاهرتز
.....۷۶.....	شکل ۱۶-۳ مدل سوئیچ برای تحلیل ANSYS. سطوح مشخص شده با اسم A1 دارای ضخامت ۱,۴ میکرومتر و دو سطح مشخص شده با اسم A2 پایه ها با ارتفاع ۱,۷ میکرومتر هستند
.....۷۷.....	شکل ۱۷-۳ شرایط مرزی و حالت بارگذاری سوئیچ. فلش های قرمز نشان دهنده جهت اعمال بار و مثلث های آبی نشان دهنده محدودیت حرکت در راستای محور قائم در پایه ها است
.....۷۸.....	شکل ۱۸-۳ حالت اولیه و حالت تغییر شکل یافته سوئیچ در اثر اعمال نیروی الکترو استاتیک
.....۷۹.....	شکل ۱۹-۳ جابجایی بازودر راستای قائم در اثر اعمال ولتاژ ۷,۸ ولت
.....۷۹.....	شکل ۲۰-۳ تنش باقی مانده در راستای محور Z
.....۸۰.....	شکل ۲۱-۳ تنش باقی مانده در راستای محور X (علامت مثبت و منفی نشان دهنده جهت تنش است)
.....۸۰.....	شکل ۲۲-۳ تنش باقی مانده در راستای محور Y (علامت مثبت و منفی نشان دهنده جهت تنش است)
.....۸۱.....	شکل ۲۳-۳ ساختار مدار $\pi$
.....۸۲.....	شکل ۲۴-۳ ساختار سوئیچ طراحی شده با مدل $\pi$
.....۸۳.....	شکل ۲۵-۳ تلفات بازگشتی در حالت عدم تحریک در سوئیچ با مدل $\pi$ و سوئیچ منفرد
.....۸۳.....	شکل ۲۶-۳ تلفات هدایت در حالت عدم تحریک در سوئیچ با مدل $\pi$ و سوئیچ منفرد
.....۸۴.....	شکل ۲۷-۳ تلفات بازگشتی در حالت تحریک در سوئیچ با مدل $\pi$ و سوئیچ منفرد
.....۸۴.....	شکل ۲۸-۳ ایزولاسیون در حالت تحریک در سوئیچ با مدل $\pi$ و سوئیچ منفرد
.....۸۴.....	شکل ۲۷-۳ تلفات بازگشتی در حالت عدم تحریک در سوئیچ با مدل $\pi$ با سه خط انتقال با طول های متفاوت
.....۸۴.....	شکل ۲۸-۳ تلفات حالت هدایت در حالت عدم تحریک در سوئیچ با مدل $\pi$ با سه خط انتقال با طول های متفاوت
.....۸۵.....	شکل ۲۹-۳ تلفات بازگشتی در حالت تحریک در سوئیچ با مدل $\pi$ با سه خط انتقال با طول های متفاوت
.....۸۶.....	شکل ۳۰-۳ ایزولاسیون در حالت تحریک در سوئیچ با مدل $\pi$ با سه خط انتقال با طول های متفاوت
.....۸۶.....	شکل ۳۱-۳ تلفات بازگشتی در حالت باز در سوئیچ با مدل $\pi$ و سوئیچ منفرد با دی الکتریک STO
.....۸۷.....	شکل ۳۲-۳ تلفات هدایت در حالت باز در سوئیچ با مدل $\pi$ و سوئیچ منفرد با دی الکتریک STO
.....۸۸.....	شکل ۳۳-۳ تلفات بازگشتی در حالت بسته در سوئیچ با مدل $\pi$ و سوئیچ منفرد با دی الکتریک STO

.....۸۸.....	شکل ۳-۳ تلفات هدایت در حالت باز در سوئیچ با مدل $\pi$ و سوئیچ منفرد با دی الکتریک STO
.....۸۸.....	شکل ۳-۳ ایزولاسیون در حالت بسته در سوئیچ با مدل $\pi$ و سوئیچ منفرد با دی الکتریک STO و SiN
.....۹۳.....	شکل ۱ برش عرضی هفت لایه در روش ساخت MUMPS [45]
.....۹۴.....	شکل ۲ مشخص کردن ابعاد قطعه در نرم افزار EM3DS
.....۹۵.....	شکل ۳ مشخص کردن ویژگی های الکترومغناطیسی هر لایه در نرم افزار EM3DS
.....۹۵.....	شکل ۴ مشخص کردن جزئیات برای تحلیل فرکانسی در نرم افزار EM3DS
	<b>فهرست جدول ها:</b>
.....۱۳.....	جدول ۱-۱ قابلیت انتقال توان در مدارهای کلیدزنی مختلف
.....۱۷.....	جدول ۲-۱ مزایا و معایب انواع روش های تحریک در سوئیچ میکروالکترومکانیکی
.....۲۰.....	جدول ۳-۱ انواع طبقه بندی سوئیچ های MEMS
.....۲۹.....	جدول ۴-۱ مقایسه سوئیچ های فرکانس بالا
.....۴۰.....	جدول ۱-۲ ابعاد سوئیچ
.....۴۲.....	جدول ۲-۲ ولتاژ تحریک برای سوئیچ طراحی شده در مرجع [24]
.....۴۳.....	جدول ۳-۲ ویژگی های سوئیچ طراحی شده در مرجع [24]
.....۴۵.....	جدول ۴-۲ مشخصات سوئیچ طراحی شده در مرجع [18]
.....۴۷.....	جدول ۵-۲ مشخصات سوئیچ طراحی شده با دو بازوی متحرک
.....۴۹.....	جدول ۶-۲ مشخصات سوئیچ ساخته شده در مرجع [23]
.....۵۴.....	جدول ۷-۲ مشخصات سوئیچ طراحی شده در مرجع [21]
.....۵۹.....	جدول ۱-۳ مشخصات فلز آلومینیوم و طلا
.....۶۹.....	جدول ۲-۳ مشخصات اولیه سوئیچ طراحی شده
.....۸۵.....	جدول ۳-۳ مقایسه پارامترهای پراکندگی سوئیچ منفرد و سوئیچ طراحی شده با مدل $\pi$
.....۸۹.....	جدول ۴-۳ مشخصات سوئیچ طراحی شده با مدل $\pi$
.....۹۰.....	جدول ۵-۳ پارامترهای پراکندگی سوئیچ طراحی شده با مدل $\pi$
.....۹۳.....	جدول ۱ نام لایه ها، ضخامت و سطح لیتوگرافی [45]

## پیشگفتار:

در دهه اخیر با رشد سریع و گسترده سیستم های فرکانس بالا مانند بیسیم و ماهواره ها، نیاز به مدارهایی با مساحت، وزن، هزینه و پیچیدگی کمتر بیشتر شده است. محدودیت فرکانس بالای مدارهای سیلیکونی باعث شده است تا از سیستم های میکرو الکترومکانیکی برای طراحی و ساخت این مدارها استفاده شود. با مجتمع سازی مستقیم قطعات MEMS<sup>1</sup> روی ویفرها، می توان بسیاری از قطعات فرکانس بالای جدا از هم<sup>2</sup> را مانند خازن ها و سوئیچ ها، با حجم بسیار کوچکی جایگزین کرد [1, 4, 14, 15, 43].

سوئیچ های فرکانس بالا به طور گسترده در کاربردهای فرکانس بالا از جمله شیفتهای فاز، حسگرها، سیستم های بیسیم و ماهواره ها مورد استفاده قرار می گیرند [1, 14, 30]. این سوئیچ ها می توانند از نوع مکانیکی مانند کوارتز، الکترونیکی مانند ترانزیستور و دیود و یا از نوع میکروالکترومکانیکی باشند. سوئیچ های مکانیکی دارای ایزولاسیون بالا و تلفات هدایت بسیار کم هستند. اما کاربرد آنها به دلیل وزن و هزینه بالا، در مدارهایی با تعداد زیاد سوئیچ مانند ماهواره ها محدود می شود. از طرفی سوئیچ های الکترونیکی به دلیل تکنولوژی ساختشان قابلیت ساخت ارزان با حجم بسیار کوچک را دارند. اما نسبت به سوئیچ های مکانیکی رفتار کلیدزنی خوبی از خود نشان نمی دهند. مثلاً در ترانزیستورها سرعت کلیدزنی بالاست. اما ایزولاسیون آنها محدود و تلفات حالت هدایتشان زیاد است. در مقابل سوئیچ های میکروالکترومکانیکی فرکانس بالا هستند که عملکرد الکترونیکی بسیار خوبی از خود نشان می دهند. از جمله مهمترین ویژگی های این سیستم ها، قابلیت مجتمع شدن آنها با تکنولوژی ارزان قیمت CMOS است. از دیگر مشخصه های این سوئیچ ها می توان به ایزولاسیون بالا، تلفات هدایت بسیار کم، پهنای باند کاری وسیع و خاصیت خطی بودن آن ها اشاره نمود [1, 4].

اما به دلیل ولتاژ تحریک بالا، این سوئیچ ها غیرقابل مجتمع شدن در مدارهای الکترونیکی با ولتاژ کاری زیر ۱۰ ولت هستند. یکی از مسائل بسیار مهم در طراحی سوئیچ میکروالکترومکانیکی فرکانس بالا کم کردن ولتاژ تحریک آن می باشد [1-7]. برای کاهش ولتاژ تحریک، بیشترین روش به کار رفته تاکنون، کاهش ضریب فنر بازوی سوئیچ است [22, 24]. ضریب فنر با توان  $\frac{1}{2}$  بر ولتاژ تحریک تاثیر می گذارد. اما از طرفی کم کردن زیاد ضریب فنر نه تنها می تواند سرعت کلیدزنی مکانیکی سوئیچ را کاهش دهد، بلکه قابلیت اطمینان کار صحیح سوئیچ را در دراز مدت محدود می کند [2, 35, 44]. توانایی سوئیچ برای کار در حدود چند صد میلیون چرخه یک نگرانی اساسی است که باید برای رسیدن به آن در طراحی سوئیچ توجه لازم شود.

---

<sup>1</sup> Micro Electro Mechanical Systems

<sup>2</sup> Discrete components



یکی دیگر از روش های کاهش ولتاژ تحریک، کم کردن ارتفاع فاصله هوایی و استفاده از دی الکتریک با ضریب دی الکتریک بزرگ، برای افزایش نسبت خازنی است [25, 34]. در این روش نیز ضریب اطمینان کاهش می یابد. زیرا ممکن است در حالت عدم تحریک، قطع کامل رخ ندهد. همچنین دی الکتریک هایی با ثابت دی الکتریک بالا معمولاً شکننده تر هستند و قابلیت اطمینان سوئیچ را کاهش می دهند. پارامتر سوم که در کاهش ولتاژ تحریک موثر است، افزایش سطوح تحریک الکتریکی است [22, 23]. افزایش سطح می تواند تا جایی ادامه پیدا کند که محدودیت حجم و تکنولوژی اجازه دهد.

سوئیچ های MEMS می توانند به طور کلی به دو دسته تقسیم بندی شوند، سوئیچ با اتصال اهمی و سوئیچ خازنی [1, 4]. سوئیچ های اهمی براساس تماس مستقیم دو فلز با یکدیگر کار می کنند و برای کاربردهای فرکانس پایین و DC مناسب هستند. اما سوئیچ های خازنی براساس تغییر ظرفیت خازنی عمل می کنند و معمولاً در کاربردهای فرکانس بالاتر مورد استفاده قرار می گیرند.

هدف از این پروژه طراحی و شبیه سازی یک سوئیچ میکروالکترومکانیکی موازی، از نوع خازنی با ولتاژ تحریک کم برای کاربرد در باند فرکانسی Ka، ۲۰ تا ۴۰ گیگاهرتز و مشخصات کلید زنی فرکانس بالای خوب می باشد. مشخصات فرکانس بالا با پارامترهای پراکندگی بررسی می شوند.

آنچه در این رساله انجام گرفته است شامل سه بخش به شرح زیر است:

فصل اول به معرفی و بررسی انواع سوئیچ های میکروالکترومکانیکی فرکانس بالا می پردازیم.

فصل دوم چند نمونه از کارهای پیشین مورد بررسی و مطالعه قرار می گیرد.

فصل سوم به طراحی و شبیه سازی یک سوئیچ میکروالکترومکانیکی فرکانس بالا اختصاص دارد. شبیه سازی الکترو مغناطیسی و الکترومکانیکی به ترتیب با استفاده از نرم افزارهای EM3DS و ANSYS انجام گرفته است.

و در انتها نیز نتیجه گیری و پیشنهادها خواهد آمد.

## فصل اول

# آشنایی با سوئیچ فرکانس بالای MEMS

از آنجایی که نیاز به یک سوئیچ خوب در مدارها به اندازه یک تقویت کننده خوب ضروری است، در مدارهای الکتریکی طراحی دقیق سوئیچ اهمیت بسیاری دارد. در بسیاری از کاربردها، لازم است تا خط انتقال به طور موقت قطع و یا وصل شود [14]. سوئیچ قطعه ای است که قابلیت قطع و وصل مدار را دارد و در یک حالت به صورت اتصال کوتاه و در حالت دیگر به صورت اتصال باز عمل می کند. ایزولاسیون بالا در حالت قطع و تلفات کم در حالت وصل<sup>۳</sup> دو نیاز اساسی در یک سوئیچ به شمار می آیند.

یک سوئیچ خوب باید در تمام بازه کار فرکانسی مدار، مشخصات مورد نیاز کلیدزنی خود را حفظ کند. بنابراین هرچه بازه کاری فرکانس وسیع تر باشد نیازمند طراحی پیچیده تر و دقیق تری هستیم.

به طور کلی سوئیچ های فرکانس بالا را می توان به سه دسته تقسیم کرد: مکانیکی، الکتریکی و میکروالکترومکانیکی. اخیرا با پیشرفت گسترده سیستم های میکروالکترومکانیکی<sup>۴</sup>، سوئیچ های فرکانس بالای میکروالکترومکانیکی مورد توجه بسیاری از سازنده ها قرار گرفته و بیش از یک دهه است که به عنوان راه حلی برای سرعت بالا و در مدارهای قابل تنظیم کاربرد دارد [3, 6, 14, 30].

از جمله ویژگی های سوئیچ های فرکانس بالای MEMS، امیدانس حالت وصل کم، امیدانس حالت قطع بالا و رفتار خطی آنها می باشد. سوئیچ های MEMS با تکنولوژی ترانزیستورهای ماسفت ساخته می شوند. به همین دلیل قابلیت مجتمع شدن در مدارهای الکتریکی و ساخت با تکنولوژی ارزان قیمت را دارند [1, 3, 6, 8].

اما با وجود این مزیت ها سوئیچ های فرکانس بالای میکروالکترومکانیکی همچنان از مسائلی مانند ولتاژ تحریک بالا و قابلیت اطمینان کار صحیح در مدت طولانی رنج می برند [1, 3, 5, 7, 8, 39].

در این فصل هدف معرفی انواع سوئیچ های فرکانس بالا و بررسی سوئیچ میکروالکترومکانیکی می باشد. همچنین انواع سوئیچ های فرکانس بالا با یکدیگر مقایسه شده اند. در انتها نیز مدل الکتریکی و مکانیکی سوئیچ میکروالکترومکانیکی مورد بررسی قرار گرفته است.

---

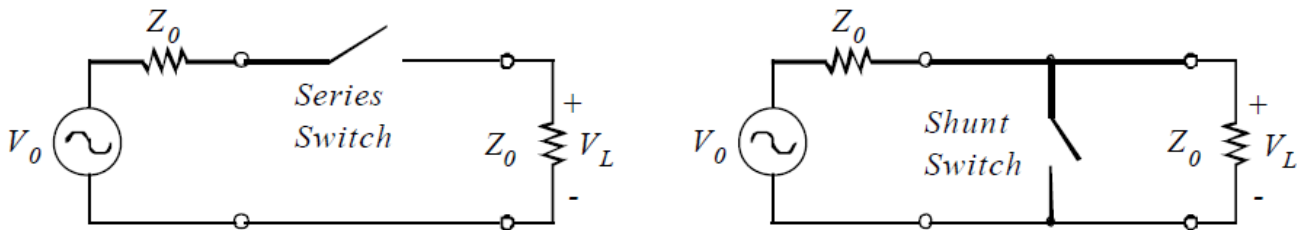
<sup>3</sup> Low insertion loss

<sup>4</sup> Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)

## ۱ + مقدمه ای بر تئوری کلیدزنی

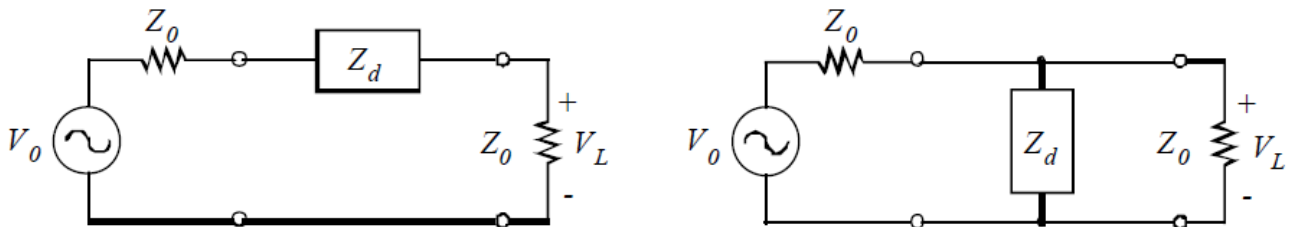
سوئیچ تک ورودی و تک خروجی، یک قطعه الکتریکی با حداقل دو سر خروجی و دو حالت کاری باز و بسته است. در حالت باز دو طرف سوئیچ اتصال باز و در حالت بسته اتصال کوتاه می شود. شکل زیر دو حالت ممکن از نحوه قرار گرفتن یک سوئیچ با یک ورودی و یک خروجی را نشان می دهد. سوئیچ سری به صورت سری در مسیر خط انتقال قرار می گیرد. بنابراین در حالت باز خط انتقال اتصال باز است و در حالت بسته خط انتقال اتصال کوتاه می شود. در حالت ایده آل یک سوئیچ سری در حالت باز ایزولاسیون نامحدود و در حالت بسته تلفات صفر دارد. معمولاً این نوع ساختار در مدارهایی که به طور متوسط بیشتر مسیر انتقال سیگنال باز است مورد استفاده قرار می گیرد.

سوئیچ موازی بین زمین و خط انتقال قرار دارد. در حالت باز مسیر خط انتقال بسته است و سیگنال از خط انتقال عبور می کند. اما در حالت بسته، سوئیچ موازی به زمین اتصال کوتاه می شود و سیگنال نمی تواند از خط انتقال عبور کند.



شکل ۱-۱ نمایش سوئیچ سری و موازی در یک مدار الکتریکی [14]

در یک سوئیچ ایده آل دو حالت کاری به معنی اتصال کوتاه کامل و یا اتصال باز کامل است. اما در سوئیچ های واقعی اتصال کوتاه کامل و یا اتصال باز کامل رخ نمی دهد. به صورت تقریبی می توان سوئیچ غیرایده آل را با یک امپدانس کنترل شده با ولتاژ یا جریان بایاس که می تواند بین دو حالت کم و زیاد تغییر کند، مدل نمود (شکل ۱-۲).



شکل ۱-۲ مدل مدار سوئیچینگ غیر ایده آل به وسیله امپدانس متغیر  $Z_d$  [14]